

“2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón”

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

“SIMULACIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO ANAEROBIO
UTILIZANDO GPS-X.”

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN
INGENIERÍA QUÍMICA

PRESENTA:

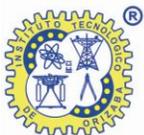
I.Q. Enrique Delgado Alvarado

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Alejandro Alvarado Lassman

CODIRECTOR DE TESIS:

M.I. Norma Alejandra Vallejo Cantú





"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

FECHA: 09/10/2015
DEPENDENCIA: POSGRADO
ASUNTO: Autorización de Impresión
OPCIÓN: I

C. ENRIQUE DELGADO ALVARADO
CANDIDATO A GRADO DE MAESTRO EN:
CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros de Enseñanza Técnica Superior, dependiente de la Dirección General de Institutos Tecnológicos de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

"SIMULACION DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO ANAEROBIO UTILIZANDO GPS-X."

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

A T E N T A M E N T E


M.C. MA. ELENA GARCÍA REYES
JEFE DE LA DIV. DE ESTUDIOS DE POSGRADO



SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO
TECNOLÓGICO
DE ORIZABA

ggc





"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

FECHA : 08/09/2015

ASUNTO: Revisión de Trabajo Escrito

C. M.C. MA. ELENA GARCÍA REYES
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACION.
P R E S E N T E

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C. :

ENRIQUE DELGADO ALVARADO

la cual lleva el título de:

"SIMULACION DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO ANAEROBIO UTILIZANDO GPS-X."

Y concluyen que se acepta.

A T E N T A M E N T E

PRESIDENTE : DR. ALEJANDRO ALVARADO LASSMAN

SECRETARIO : M.I. NORMA ALEJANDRA VALLEJO CANTU

VOCAL : DR. JUAN MANUEL MENDEZ CONTRERAS

VOCAL SUP. : M.I. ADRIAN REYES BENITEZ

EGRESADO(A) DE LA MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA

OPCION: I Tesis



DEDICADO A:

A DIOS:

En primer lugar por permitirme la culminación de este logro y satisfacción, porque me ha permitido tener los conocimientos que ahora tengo y por permitirme el don de la vida pese a mis accidentes. A él, quien me ha enseñado el significado del amor, la fe y que ha iluminado, protegido y llenado de bendiciones mi camino.

Gracias por los errores y aciertos, por ponerme en el camino pruebas en las cuales soy tu aprendiz y gracias porque de los tropiezos he aprendido a levantarme. Te doy gracias por la familia que me has dado, por mis amigos, profesores y personas que se han cruzado en mi vida y que he conocido durante este tiempo que tengo de vida.

A MIS PADRES:

L.A.E. Jorge González y PROF. Veronica Isabel Alvarado Maciel, quienes han sido mi inspiración, por su apoyo en todos los sentidos, para llegar a este momento, por estar siempre a mi lado y por ayudarme a realizar mis sueños. Agradezco sus enseñanzas, cuidados, desvelos, regaños y consejos, sin duda son el motivo mas importante para mi, sin ustedes no hubiese sido posible esto, gracias por haber creído y confiado siempre en mi.

Gracias por estar conmigo en los momentos buenos y malos, ahora se que alcanzar objetivos en la vida de gran importancia no es fácil, pero cuando se llega a la culminación de ellos son gratos y satisfactorios, le doy gracias a dios por tenerlos a mi lado, los admiro y amo.

A MI HERMANA:

LIC. Veronica Brigitte González Alvarado quien me ha apoyado, acompañado, y hemos compartido grandes momentos, buenos y malos, siempre esta conmigo compartiendo grandes momentos inolvidables, como este tan importante, como el culminar este esfuerzo.

A MI NOVIA:

Ing. Monica Cruz Muñoz por su gran apoyo hacia mi persona y comprensión en los momentos finales de esta etapa, por sus palabras de aliento, paciencia, amor y sobre todo por escucharme cuando tuve momentos de desesperación, angustia, gracias, por cada abrazo, por estar junto a mi, por ser tu, y creer en esto y en mi.

AGRADECIMIENTO A:

A MI DIRECTOR DE TESIS:

DR. Alejandro Alvarado Lassman, quiero agradecerle por su amistad, orientación, por tenerme la paciencia necesaria para ayudarme, por su apoyo, quiero decirle GRACIAS, si, con mayúsculas, porque es mucho lo que tengo que agradecer. Gracias por creer en mí y en mis posibilidades, por haberme permitido trabajar con usted durante estos dos años, en asignaturas que me han aportado mucho por ser de especial interés para mí: Diseño de Reactores Bioquímicos y Manejo y Disposición de Residuos Sólidos Orgánicos, así como sus múltiples consejos que me dio a lo largo del desarrollo de esta tesis, así como hace dos años en la revisión y titulación de ingeniería. Menos mal que cuando a veces he visto “todo negro” su visión ha sido más optimista. Gracias por su cercanía y apoyo, esto hubiera sido difícil sin usted como guía en este camino. La verdad le agradezco de corazón por su gran conocimiento que tiene en el manejo de modelado matemático y digestión anaerobia y de verdad lo admiro mucho, espero poder algún día ser como usted, una persona inteligente, ecuaníme, optimista, alegre y con gran visión. Este trabajo es el resultado del esfuerzo empleado a lo largo de estos años.

AL DR. ALBINO MARTINEZ SIBAJA:

Por su orientación, apoyo, amistad, regaños, consejos, en la enseñanza del software Simulink para el desarrollo del modelo UCTADM1.

A MIS SINODALES:

Quiero agradecer a la MCIQ. Norma Alejandra Vallejo Cantu, por su valioso tiempo, y apoyo, dedicación, por confiar en mi incondicionalmente, por sus regaños, palabras, lo que me enseñó y así ayudarme a ser una mejor persona. Dr. Juan Manuel Méndez Contreras y al MCIA. Adrian Reyes por sus acertados consejos y por todos los conocimientos que me transmitieron en el transcurso de mi estancia en la maestría en ciencias en ingeniería química de esta mi alma mater. Por su sinceridad, conocimientos y amabilidad, muchas gracias, dios los bendiga siempre.

A MIS CATEDRÁTICOS:

Dra. Guadalupe Solano, Dra. Leticia Lopez Zamora, Dra. Yolanda Pliego, Dra. Rosalia Cerecedo, MCIQ. Norma Alejandra Vallejo Cantú, Mc. Mara Elena Reyes García, Dr. Denis Cantu, Dr. Juan Manuel Mendez Contreras, Dr. Alejandro Alvarado Lassman,

DR. Galo Rafael, Dr. Eusebio Bolaños, MCIQ. Adrian Reyes. A todos ustedes muchas gracias por todos su conocimiento que me aportaron a mi formación desde ingeniería hasta este momento.

A MIS TIOS:

Dr. Alvaro lechuga Martínez, SEN. Lic. Felix Lechuga Martinez, QFB. Norma Alvarado Maciel, DR. Omar Alvarado Maciel, Dra. Amalia Alvarado Maciel, ING. Ignacio Alvarado Maciel, Elena Alvarado Maciel, ING. Plinio Maciel Teysier, ING. Homero Maciel Teysier, Benjamin Maciel Gomez, Iris Maciel, Karina Maciel, Magali Maciel, Rosa Tirado Maciel, Lic. Antonio Jimenez Maciel, ARQ. Javier Jimenez Maciel, LIC. Javier Rodriguez Maciel, Oscar Rodriguez Maciel, Arturo Rodriguez Maciel, Victor Hugo Maciel Romano, Eduardo Maciel Romano, Liliana Maciel Romano, en fin no quiero olvidarme de nadie y se que aun faltan por citar muchos mas de la familia, pero quiero agradecer a todos y no dejar a fuera a nadie, gracias por ser mi familia, por estar juntos y seguir conviviendo todos los días de una manera u otra, muchas gracias a todos, dios los bendiga hoy y siempre.

A MIS PRIMOS:

Lic. Ricardo Lechuga Alvarado, Daniel Lechuga Alvarado, ING. Alvaro Lechuga Alvarado, MIA. Javier Colmenares Alvarado, ING. Carlos Miguel Cortazar Alvarado, Omar Alvarado Cupil, LIC.diseño. Engelbert Flores Maciel, Aylin Maciel, Jesús Delgado Maciel, Lic. Maru Tirado Maciel, Ingrid Rossana Rodriguez Maciel, Iris Rodriguez Maciel, Darci Maciel, Homero Maciel, Elsy Franco Maciel, Cindy Mattus Maciel, Jaime Mattus Maciel, en fin de igual manera agradezco a cada uno de ustedes, mis primos que hemos compartido grandes momentos, de igual manera no quiero pasar u olvidarme de alguno, sin embargo están presentes en este logro, gracias a sus palabras, apoyo, charlas, platicas para seguir adelante en momentos de flaqueza.

A MIS AMIGOS:

DR. Amir Calderón, ING.Mario Eduardo Ambrosio, Ángel Juárez Tabarez, IQ.Alejandra Morales, Angely Gongora, IQ.Paco Blanco Rojas, Lupita Ambrosio, ING. José Colli Misset, QFB. Angélica Hernández, ING. Rafael Ramírez Guerrero, MCIQ. Kelvyn Sánchez, MCIQ. Marco Benitez Espindola, Sandra Isabel Romero Trujeque, Ana Carmona Schettino, MC.Victor Alfonso Cruz Arenas, Jaime Montoya, Marcos Hernandez, Joana Juárez Tabarez, Fatima Reyes, Edgar Rene Martínez Pons, Amairani Aldaco Fernandez, MCIQ. Arturo Solís Mendéz, MICQ. Mariana Molina

Quintero, MCIQ. Erick Ramirez Polanco, Rafael Quiros, Flavino Rios Alvarado, Eduardo Martinez Rojo, Adrian Rosas Cuevas, Guillermo Lopez Porillo, Ángel Sagardi, Lic. José Luis Saenz Soto, Dr. Volker Henssel, Dr. Erhard Hermman, Lic. Nicolás Callejas Arroyo, Lic. Juan Rodriguez Arroyo.

A mi amigos y entrenadores de Atletismo los cuales también formaron parte de mi vida, en algún momento se cruzaron en mi camino, compitiendo contra mi, y forman parte de mi vida, son también parte de mi familia, empezando en selección mexicana con quienes conviví, mis rivales deportivamente hablando y que se volvieron mis amigos, que me ayudaron a creer, crecer, avanzar y que en el diccionario es el único lugar donde éxito va primero que trabajo. Quiero agradecer infinitamente por todo y pese a que yo tome otro camino en su momento estuvieron y están aquí y creyeron todo el tiempo en mí, gracias a Daniela Sanchez Renata, Carmen Correa, Pamela Treviño, Tiffany Richeson, Anastasia Sadovnikova, Georgina Tamez, Carolina Hamilton, Liliana Hernandez, Dayana Mendoza Murillo, Ysrael Rergis, Emily Infeld, Sandi Lynn Morris, Carlos Herrera, Alejandra Maldonado, Lenin Sandoval, Hanna Peterson, Osmaidel Pellicier Lescay, Blanca Vlasic Zvijezda, Zudikey Rodriguez Nuñez, Eder Sanchez, Lidia Santos, Luis Alberto Rivera, Natalie Reifschneider, Raul Barreda Mauri, Juan Luis Barrios, Alejandro Cardenas Robles, Julian Alfonso Tamez, Dayron Robles, Romary Rifka, Edgar Rivera, Bailey Roth, Doc Patton. Agradezo de todo corazón sus amistad, consejos y su confianza, gracias a todos ustedes amigos por su confianza y por todos los momentos que pasamos juntos.

Y todas esas personas en mi vida que he conocido durante todo este tiempo, las que ya no están conmigo, las que estuvieron, las que me motivaron para seguir adelante, seguir mi camino, no claudicar ante nada, gracias a la personas que me dieron una lección de vida, de superación, de amor, motivación, sabiduría, humildad, optimismo, gracias a todos de verdad dios los bendiga y cuide hoy y siempre.

Hoy doy gracias a dios, a la vida, por esos momentos, sucesos, historias, hechos en mi vida, pero especialmente a dios y a ustedes que fueron y son parte de ella.

IQ.ENRIQUE DELGADO ALVARADO

RESUMEN

SIMULACIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO ANAEROBIO UTILIZANDO GPS-X

Elaborada por: IQ. Enrique Delgado Alvarado

Dirigida por: DR. Alejandro Alvarado Lassman

Co-dirigido por: M.I.Q. Norma A. Vallejo Cantú

La digestión anaerobia (DA) es un bioproceso de múltiples pasos en el que la materia orgánica compleja es convertida en simples compuestos sin un aceptor de electrones externos tales como oxígeno o nitrato. La digestión anaerobia esta presente en muchos ecosistemas naturales donde se involucran ciclos bioquímicos de la materia orgánica. Los residuos orgánicos constituyen una fuente importante de biomasa la cual se puede convertir en energía mediante la digestión anaerobia. Los digestores anaerobios han sido desarrollados para una variedad de aplicaciones donde se recupera la energía en forma de biogás, por su contenido de metano.

Los modelos matemáticos de digestión anaerobia han sido investigados ampliamente y se han desarrollado para entender aspectos como la distribución de desechos y biomasa metanogénica dentro del bioreactor o la dinámica del comportamiento en fase transitoria y lo encontramos en el modelo tradicional ADM1 y el modelo modificado UCTADM1. La optimización del proceso de digestión anaerobia utilizando el modelo UCTADM1 logro un incremento de la eficiencia del modelo entre un 15-20 %.

Los cuáles fueron descritos para realizar la simulación de procesos de digestión anaerobia en estado dinámico, los cuales ya los podemos encontrar en algunos software enfocados al tratamiento de plantas de residuos, tal es el caso del software GPS-X en su versión 6.4 y el cual es fundamental para observar el comportamiento de nuestro proceso a través del tiempo, lo que se le conoce como simulación dinámica y que son descritos mediante los modelos matemáticos.

ABSTRACT

SIMULATION OF ANAEROBIC TREATMENT PLANT USING GPS-X

Produced by: I. Q. Enrique Delgado Alvarado

Advisor (s): DR. Alejandro Alvarado Lassman

M.I.Q. Norma A. Vallejo Cantú

The Anaerobic Digestion (DA) is a multi-step bioprocess in which complex organic matter is converted in simpler compounds without an external electron acceptor such as oxygen or nitrate. The Anaerobic Digestion is present in many natural ecosystems where is involving organic matter's bioquimical cycles. The organic wastes constitute a important source of biomass which can be converted to energy by anaerobic digestion. The Anaerobic digesters have been developed for a variety of applications where energy is recovered in the form of biogas, by their content methane.

The Mathematics Models of Anaerobic Digestion had been widely investigated and developed to understand aspects such as the distribution of wastes and methanogenic biomass inside the bioreactor or the dynamics of behavior in transitory phase and found the traditional model ADM1 and the modified model UCTADM1. The optimization of anaerobic digestion's process, using the UCTADM1 model, achieved an increase in the model's efficiency between 15-20 %

Which were described to do the simulation of anaerobic digestión processes in a dynamic state, which we can find in some software focused on the treatment of waste plants, such as GPS-X software in it version 6.4, that is fundamentally applicated to observe the behavior of our process over time, an as known as dynamic simulation and described by mathematical models.

INDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVO GENERAL.....	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
JUSTIFICACIÓN.....	4
CAPÍTULO I FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	6
1.1 Generalidades de la digestión anaerobia.....	7
1.1.1 Justificación de la digestión anaerobia.....	7
1.1.2 Digestión anaerobia.....	8
1.1.3 Historia del proceso anaerobio.....	9
1.1.4 Etapas de la digestión anaerobia.....	10
1.1.4.1 Hidrólisis.....	11
1.1.4.2 Acidogénesis.....	12
1.1.4.3 Acetogénesis.....	12
1.1.4.4 Metanogénesis.....	13
1.1.5 Factores que influyen a la digestión anaerobia.....	14
1.1.6 Clasificación de la digestión anaerobia.....	14
1.1.7 Productos finales de la digestión anaerobia.....	15
1.1.8 Características del biogás.....	16
1.1.8.1 Uso del biogás.....	16
1.1.9 Digestión de aguas residuales.....	17
1.1.10 Sistemas de dos etapas.....	17
1.1.11 Sistemas de dos fases.....	18
1.1.12 Operación de digestores.....	18
1.1.13 Residuos sólidos.....	19
1.2 Generalidades de plantas de tratamiento de digestión anaerobia.....	19
1.2.1 Plantas de tratamiento de aguas residuales.....	20

1.2.2	Legislación ambiental.....	21
1.3	Generalidades de la simulación.....	22
1.3.1	Conceptos básicos de la simulación.....	22
1.3.2	Beneficios de la simulación.....	24
1.3.3	Simuladores computacionales.....	24
1.3.4	Elección del software de simulación.....	26
1.4	Simulación de procesos ambientales.....	26
1.4.1	Simuladores comerciales ambientales.....	26
1.5	Simulador GPS-X.....	27
1.5.1	Beneficios de elegir GPS-X.....	28
1.5.2	Características del GPS-X.....	29
1.5.3	Librería del GPS-X.....	30
1.5.4	Modelos del proceso.....	34
1.6	Modelos de digestión anaerobia.....	39
1.6.1	Modelo de digestión anaerobia ADM1.....	39
1.6.2	Utilización del modelo ADM1.....	42
	CAPITULO II MATERIALES Y MÉTODOS.....	44
2.1	Primera fase.....	47
2.1.1	Obtención de datos de los efluentes y selección de equipo.....	47
2.2	Segunda fase.....	57
2.2.1	Obtención de parámetros no reportados.....	57
2.3	Tercera fase.....	61
2.3.1	Simulación de una planta de tratamiento anaerobio.....	61
2.4	Cuarta fase.....	63
2.4.1	Simulación de la planta de aprovechamiento de residuos sólidos.....	63
2.4.2	Cálculo de la producción de metano.....	65
2.4.2.1	Determinación del potencial de metano mediante la ecuación de Buswell.....	65

2.4.2.2	Simulación de la planta de aprovechamiento de residuo sólidos mediante el modelo UCTADM1.....	67
2.5	Quinta fase.....	68
CAPITULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		69
3.1	Primera fase: definición de las características de los efluentes y selección del equipo.....	70
3.2	Segunda fase: Obtención de parámetros no reportados.....	73
3.3	Tercera fase: Simulación de plantas de tratamiento anaerobio.....	77
3.4	Cuarta Fase: Simulación de la planta de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos.....	98
3.4.1	Caracterización física de los residuos sólidos orgánicos municipales.....	100
3.4.2	Características físicoquímicas de los residuos sólidos orgánicos.....	101
3.4.3	Selección de equipos para la planta de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos municipales	105
3.4.4	Caracterización físicoquímicas de la fracción soluble de RSOM a hidrolizar.....	108
3.4.5	Resultados obtenidos de la simulación en simulink con el modelo UCTADM1.....	111
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		117
BIBLIOGRAFÍA ALFABÉTICA.....		119
ANEXOS.....		127
	Anexo (A) Parámetros y sugerencias en el software GPS-X.....	128
	Anexo (B) Ecuaciones diferenciales del modelo UCTADM1.....	135
	Anexo (C) Programación del modelo UCTADM1 en aquasim.....	139
	Anexo (D) Gráfica de caracterización de residuos orgánicos del mercado de rio blanco.....	216

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1	Diversas clasificaciones de la digestión anaerobia.....	15
Tabla 1.2	Simuladores comerciales ambientales.....	27
Tabla 1.3	Librería CNP, variables de estado.....	33
Tabla 1.4	CNP Biblioteca de variables compuestas.....	34
Tabla 1.5	Modelos del proceso.....	37
Tabla 2.1	Caracterización del efluente de un caso de estudio real.....	48
Tabla 2.2	Caracterización del efluente.....	48
Tabla 2.3	Características del efluente de la planta de tratamiento en el reactor EGSB.....	49
Tabla 2.4	Características del efluente de la planta de tratamiento en el reactor RFLI.....	50
Tabla 2.5	Características de diseño de los reactores de digestión anaerobia.....	52
Tabla 2.6	Parámetros de monitoreo.....	54
Tabla 2.7	Parámetros de monitoreo.....	66
Tabla 3.1	Características de la fracción soluble de RSOM.....	72
Tabla 3.2	Características de los efluentes.....	72
Tabla 3.2	Características de los efluentes: Continuación.....	73
Tabla 3.3	Matriz del modelo UCTADM1 Sotemann (2005) y modificada, incluyendo el modelo de Musvoto (2000 ^a).....	87
Tabla 3.4	Estequiometría del proceso de digestión anaerobia en el modelo UCTADM1.....	88
Tabla 3.5	Estequiometría del proceso de digestión anaerobia en el modelo UCTADM1.....	89
Tabla 3.6	Estequiometría del proceso de digestión anaerobia en el modelo UCTADM1.....	89
Tabla 3.7	Estequiometría del proceso de digestión anaerobia en el modelo UCTADM1.....	90

Tabla 3.8	Estequiometria del proceso de digestión anaerobia en el modelo UCTADM1.....	91
Tabla 3.9	Estequiometria del proceso de digestión anaerobia en el modelo UCTADM1.....	91
Tabla3.10	Constantes estequiométricos y cinéticas a 37 grados centígrados.....	92
Tabla 3.11	Valores estequiométricos obtenidos de nuestro modelo UCTADM1 estequiometria.....	93
Tabla 3.12	Caracterización de RSOM en base a 1kg.....	101
Tabla 3.13	Características de los RSOM de manera individual.....	102
Tabla 3.14	Caracterización fisicoquímicas de la FRSOM.....	104
Tabla 3.15	Medidas del reactor de hidrólisis.....	106
Tabla 3.16	Características del reactor anaerobio.....	107
Tabla 3.17	Porcentaje del volumen total y de trabajo del reactor anaerobio.....	107
Tabla 3.18	Caracterización fisicoquímica de la fracción con bajo contenido en solidos de RSOM inicial (sin tratamiento).....	109
Tabla 3.19	Resultados de análisis de residuos orgánicos de laboratorio.....	112
Tabla 3.20	Valores para la formulación de CHON realizados por Ristow.....	114

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Proceso de digestión anaerobia.....	11
Figura 1.2	Librería del GPS-X versión 6.2.....	31
Figura 1.3	Ámbito de aplicación de los modelos ASM2D y ADM1 en sistemas de depuración de aguas.....	39
Figura 1.4	Diagrama de flujo simplificado ADM1.....	41
Figura 1.5	Sugerencias de caracterización de efluente.....	42
Figura 1.6	Descripción grafica de un proceso anaerobio.....	43
Figura 2.1	Metodología.....	46
Figura 2.2	Parámetros requeridos por el simulador GPS-X efluente.....	56
Figura 2.3	Tren de tratamiento de digestión anaerobia.....	62
Figura 3.1	Planta de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos urbanos.....	71
Figura 3.2	Digestor anaerobio.....	74
Figura 3.3	Selección del modelo ADM1.....	74
Figura 3.4	Componentes del influente para el digestor anaerobio.....	74
Figura 3.5	Concentraciones iniciales.....	75
Figura 3.6	Tren de tratamiento de digestión anaerobia.....	77
Figura 3.7	Diagrama de flujo del modelo UCTADM1.....	80
Figura 3.8	SSTI vs SST.....	81
Figura 3.9	TN.....	81
Figura 3.10	CH ₄ /DQO vs CO ₂ / VSS.....	82
Figura 3.11	TKN vs DQO vs taza de VSS / SST.....	82
Figura 3.12	P cont DS vs N cont DS.....	82
Figura 3.13	Substancias toxicas vs SSV.....	83
Figura 3.14	SSIT vs SSTT.....	83
Figura 3.15	TN.....	83
Figura 3.16	Substancias toxicas vs metanogénesis.....	84

Figura 3.17	P vs N (Solidos contenidos en el digestor).....	84
Figura 3.18	TKN vs DQO vs VSST / SST.....	84
Figura 3.19	CH ₄ / DQO vs CO ₂ vs DQO.....	85
Figura 3.20	Desarrollo de las ecuaciones diferenciales dentro del subsistema.....	96
Figura 3.21	Modelo UCTADM1 desarrollado en Simulink.....	97
Figura 3.22	Comparación del modelo UCTADM1 reportados vs obtenidos.....	98
Figura 3.23	Composicion de la materia orgánica.....	100
Figura 3.24	Diagrama de flujo de la planta de aprovechamiento de RSO.....	105
Figura 3.25	Comparacion de la producción de bioenergía de los modelos.....	111
Figura 3.26	Estequiometria de la degradación de la materia orgánica con el modelo UCTADM1.....	115
Figura 3.27	Diagrama de producción de metano.....	116

NOMENCLATURA

ABREVIATURA	SIGNIFICADO	UNIDADES
DA	Digestión Anaerobia	[--]
AGV's	Ácidos Grasos Volátiles	ppm o mg/L
Cva	Carga Volumétrica Aplicada	g DQO/L.d
ADM1	Modelo de Digestión Anaerobia No1	[--]
RSU	Residuos Sólidos Urbanos	[--]
RSO	Residuos Sólidos Orgánicos	[--]
RSOM	Residuos Sólidos Orgánicos Municipales	[--]
SEMARNAT	Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales	[--]
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía	[--]
SEDESMA	Secretaria de Desarrollo Social y Medio Ambiente	[--]
LGEEPA	Ley General de Desarrollo Social y Protección Ambiental	[--]
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua	[--]
UASB	Manto de Lodos de Flujo Ascendente	[--]
SSF	Solidos Suspendidos Fijos	g/L
SST	Solidos Suspendidos Totales	g/L
SSV	Solidos Suspendidos Volátiles	g/L
TC	Carbón Total	mg/L
TOC	Carbón Orgánico Total	mg/L
TRH	Tiempo de Residencia Hidráulico	[--]
DQO's	Demanda Química de Oxígeno Soluble	g DQOs/L
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales	[--]
IWA	Asociación Internacional del Agua	[--]
UCTADM1	Universidad de Cape Town Modelo de Digestión Anaerobia No.1	[--]
CNP	Carbono-Nitrógeno-Fosforo	mg/L

INTRODUCCIÓN

La contaminación es un problema grave al cual nos hemos enfrentado en los últimos años, por ello que en nuestro país el gobierno ha intentado desarrollar programas de manejo de residuos, basados en la tecnología de rellenos sanitarios incluyendo intentos por reciclar residuos que lamentablemente no ofrecieron resultados satisfactorios por los altos costos de mantenimiento.

El proceso de Digestión anaerobia se presentó como una alternativa para el aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos (basura). Esta alternativa representa una solución a la problemática de contaminación en nuestro país, con la ventaja que dicho proceso genera biogás como fuente energética y además puede contribuir a la disminución del volúmen de residuos sólidos orgánicos urbanos.

La digestión anaerobia es uno de los procesos más antiguos que se caracteriza por la conversión de la materia orgánica a metano y CO_2 , en ausencia de oxígeno y con la interacción de diferentes poblaciones bacterianas. La digestión anaerobia se lleva a cabo en ambientes naturales como los pantanos, en zonas anegadas para el cultivo, en los sedimentos de lagos y mares, en zonas anóxicas del suelo y en fuentes de aguas termales sulfurosas. La digestión anaerobia también conocida biometanización genera como productos: biogás y lodo residual en menor cantidad.

Estos productos se obtuvieron en plantas de tratamiento anaerobio, las cuáles consisten en una serie de procesos físicosquímicos y biológicos que tienen como fin eliminar los contaminantes presentes en el agua o residuos sólidos. Se basa esencialmente en el conocimiento de su origen, caracterización, y productos que se desean obtener.

Actualmente se tomó en consideración las nuevas herramientas tecnológicas desarrolladas como los simuladores de plantas de tratamiento o software de proceso, los cuáles son de gran utilidad para evaluar, plantear, visualizar y analizar de manera rápida y congruentes los diseños de plantas de tratamiento de digestión anaerobia, así como el factor económico que es de suma importancia. Específicamente el simulador GPS-X y la aplicación del modelo ADM1, son de gran utilidad para la simulación de reactores anaerobias de alta carga.

Este simulador fue creado por la empresa canadiense Hydromantis a mediados de 1991, incluye el modelo ADM1 para incluir procesos de tratamiento utilizando la digestión anaerobia. El modelo ADM1 fue creado por (Batstone et al., 2002). Una de las ventajas que nos permite este modelo es realizar cambios en el modelo para hacerlo flexible(es un modelo genérico). El modelo estructurado incluye los cinco pasos de procesos, como: la desintegración, hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

OBJETIVO GENERAL

Simular procesos anaerobios de tratamiento de aguas residuales con reactores de alta eficacia mediante el simulador GPS-X y la aplicación del modelo ADM1

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Definir las características de los efluentes, equipos de procesos y parámetros operativos en el simulador GPS-X
2. Aplicar el simulador GPS-X a procesos de tratamiento anaerobio estudiados previamente.
3. Desarrollar la simulación del proceso de aprovechamiento de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos.

JUSTIFICACIÓN

En México uno de los principales problemas que aquejan el entorno ambiental y dificultan la calidad de vida de la sociedad, tiene que ver con los grandes volúmenes de residuos sólidos urbanos (RSU) que se generan diariamente en nuestro país, por el escaso o nulo tratamiento que reciben. Tan solo en nuestro país generamos anualmente cerca de 34.6 millones de toneladas de residuos sólidos urbano, lo que es equivalente a 94,800 toneladas de residuos sólidos urbanos diariamente de las cuales aproximadamente se recolecta el 87%, pero queda disperso un 13% que se deposita en tiraderos clandestinos, lotes baldíos o áreas verdes, ocasionando problemas de contaminación del agua, aire y suelo, así como riesgos en materia de salud pública provocados por la fauna nociva y gases tóxicos que la mezcla de residuos genera. (SEMARNAT, 2013).

Se estima que cerca de la mitad (43.5%) son residuos orgánicos, es decir materiales que se pudren como plantas, animales y residuos de comida; 28% residuos potencialmente aprovechables como papel, cartón, aluminio, vidrio entre otros y el 28.5% residuos no aprovechables.

Según reportes de la SEMARNAT (2013) cada habitante en México genera 1 kilo de residuo al día, sin embargo esto puede variar dependiendo la zona en la que se encuentre, siendo las regiones del norte del país y el Distrito Federal quienes llegan a producir 1.5 kg por día.

El estado de Veracruz genera el 5 % del total de residuos sólidos urbanos generados en el país. Según datos de la (INEGI, 2013), en la entidad se recolectan en promedio 5 mil 670 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos, desechos generados en las viviendas, parques, jardines y edificios públicos (SEDEMA, 2013).

Por lo tanto, en la región los mercados municipales generan 200 toneladas diarias de residuos, de los cuales 130 toneladas son de Orizaba.

Atendiendo esta problemática, el I. T. O. a través del grupo de investigación en ingeniería ambiental creó en la institución una planta de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, para tratar dichos residuos por medio de la digestión anaerobia (en ausencia de aire) generando biogás, el cual puede ser quemado y aprovechado en procesos que requieran calentamiento o en generadores eléctricos para aprovechar la energía calorífica en electricidad.

Por otro lado, la simulación de procesos ofreció la posibilidad de recrear los sistemas de tratamiento. De esta manera, podremos predecir el comportamiento del proceso en diferentes escenarios y auxiliar el manejo operacional, desarrollando estrategias que mejoren la estabilidad de los procesos, para su análisis y optimización sin necesidad de trabajar en las modificaciones físicas de la planta, lo que da como resultado un ahorro en tiempo y dinero.

El simulador GPS-X en su versión 6.2, ofreció ventajas para lograr la simulación de plantas de tratamiento ya que cuenta con los modelos matemáticos correspondientes a lodos activados como de digestión anaerobia y los procesos de tratamiento primarios, secundarios y terciarios.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

CAPÍTULO I FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Uno de los principales problemas en la actualidad, tanto a nivel nacional e internacional es la alta producción de residuos sólidos orgánicos (RSO), es por ello, que el sector público tiene como objetivo abatir y controlar la generación excesiva de dichos residuos, por ende la contaminación ambiental generada por el mismo. Los residuos sólidos pueden tener varios efectos ambientales negativos. Uno de ellos causado por que son vertidos en aguas superficiales , los cuales modifican la estructura física del hábitat e impactan negativamente la calidad del agua; dicha agua subterránea de los acuíferos puede contaminarse por la infiltración de los lixiviados resultado de residuos que contienen materiales tóxicos depositados sobre ellos (SEMARNAT, 2003). Estos residuos también alteran la calidad del aire, ocasionando frecuentemente la generación de malos olores, así como la producción de humos, gases y partículas en suspensión por la quema intencional o espontánea de basura. Por otro lado, la presencia de roedores, cucarachas e insectos asociados a los tiraderos, los cuales pueden provocar diversas enfermedades como lo son el cólera, disentería, leptospirosis, así como amibiasis, entre otras.

1.1 Generalidades de la digestión anaerobia

1.1.1 Justificación de la digestión anaerobia

A causa del fácil financiamiento, la disposición de los residuos en rellenos sanitarios ha sido utilizada durante décadas. A pesar de esto, estudios realizados por (erickson et al., 2005) reportan que al reducir el uso de rellenos sanitarios a fin de incrementar el reciclaje de energía con materiales, se logrará un menor impacto ambiental, obteniendo un bajo consumo en las fuentes de energía y bajo costo económico. Sin embargo, si enterramos estos residuos junto con otras fracciones orgánicas, implicaría

costos extras para el tratamiento de lixiviados, así como la calidad del biogás y costos elevados al momento de clausurarlas.

A diferencia con un relleno sanitario, la digestión anaerobia de residuos orgánicos tiene la ventaja de una inactivación de procesos bioquímicos y biológicos con el fin de lograr evitar la generación de gases, la emisión de olores y la inmoviliación de contaminantes.

1.1.2 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un substrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, por un consorcio de bacterias sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno o sus precursores. Utilizando el proceso de digestión anaerobia es posible poder convertir gran cantidad de residuos, residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de algunas industrias químicas

Con la ayuda de la degradación anaerobia, la cual se lleva a cabo principalmente por la acción conjunta de tres grupos principales de microorganismo (Hattori, 2008); como lo son: las bacterias fermentativas primarias (hidrolíticas-acidogénicas), bacterias anaerobias oxidantes (sintróficas - acetogénicas) y bacterias metanogénicas. Los microorganismos fermentativos descomponen los biopolímeros (lípidos, proteínas, ácidos nucleicos, carbohidratos, etc.) a monómeros solubles (largas cadenas de ácidos grasos, glicerol, aminoácidos, pirimidinas, monoazúcares, etc.) que posteriormente son convertidas a cadenas cortas de ácidos grasos como son: (butirato, propionato, acetato, etc.) alcoholes, (etanol y metanol), hidrógeno y dióxido de carbono, hecho producido por los mismos microbios.

1.1.3 Historia del proceso anaerobio

La digestión anaerobia es uno de los procesos más antiguos empleados en la estabilización de lodos. En este proceso se propicia la degradación de la materia orgánica contenida, en ausencia de oxígeno molecular. Sus principales aplicaciones han sido y siguen siendo en la actualidad la estabilización de lodos concentrados producidos en el tratamiento del agua residual y de ciertos residuos industriales. Sin embargo se ha demostrado recientemente, que los residuos orgánicos diluidos pueden ser tratados anaeróbicamente.

En el siglo XVIII el científico volta investigó e identificó el gas producido por los pantanos. Dalton, en el año de 1804, estableció la composición química del metano (CH_4). Fue hasta mediado del siglo XIX que no se tenía certeza de la presencia de organismos vivos unicelulares en el proceso, siendo Beauchamp, en el año de 1868, quien afirmó la presencia de microorganismo en los procesos de producción de metano. Pasteur describió que si incrementamos la temperatura favorecería el desarrollo de los microorganismos más interesantes. Propoff en el año de 1875, descubrió que la formación de biogás solo se producía en condiciones anaerobias.

En la India, a partir de la década de los 60, se impulsó considerablemente la tecnología de producción de biogás a partir de estiércol bovino con el doble objetivo del aprovechamiento energético y mantenimiento de las propiedades fertilizantes. En china se ha fomentado también, desde la década de los 70, la construcción de digestores, mediante programas correspondientes al ámbito nacional.

Con la baja de los precios del petróleo a finales de los años ochenta, el interés por la tecnología de digestión anaerobia volvió a decaer, aunque en algunos países industrializados lograron desarrollar importantes y reconocidos programas de plantas anaerobias a escalas industriales, las cuales tenían como objetivo primordial la gestión de residuos, principalmente ganaderos, la estabilización e higienización de los mismos

y el fomento de las conocidas energías renovables, esto para poder lograr y disminuir la emisión neta de gases de efecto invernadero. El principal exponente de los procesos anaeróbios es Dinamarca, en el año de 1985 inicio un programa de demostración, el cual desarrollo conjuntamente con los ministerios de agricultura, energía y medio ambiente en un esfuerzo por demostrar el potencial de grandes plantas de digestión anaerobia como productores de energía eléctrica.

1.1.4 Etapas de la digestión anaerobia

La primera fase es la hidrólisis de partículas y moléculas complejas (proteínas, carbohidratos y lípidos) que son hidrolizadas por enzimas extracelulares producidas por los microorganismos acidogénicos o fermentativos. Como resultado se producen compuestos solubles más sencillos (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga) que serán metabolizados por las bacterias acidogénicas dando lugar, principalmente, a ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, hidrógeno, dióxido de carbono y otros productos intermedios. Los ácidos grasos de la cadena corta son transformados en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, mediante la acción de los microorganismos acetogénicos. Por ultimo, los microorganismos metanogénicos producen metano a partir de ácido acético H_2 y CO_2 . Por lo cual, el proceso de digestión anaerobia consiste en cuatro fases, como lo son: hidrólisis (bacterias hidrolíticas), acidogénesis (acidogénéticas), acetogénesis (acetogénéticas) y la metanogénesis (metanogénicas). En la figura 1.1 se muestra las distintas fases del proceso de digestión anaerobia y productos intermedios generados.

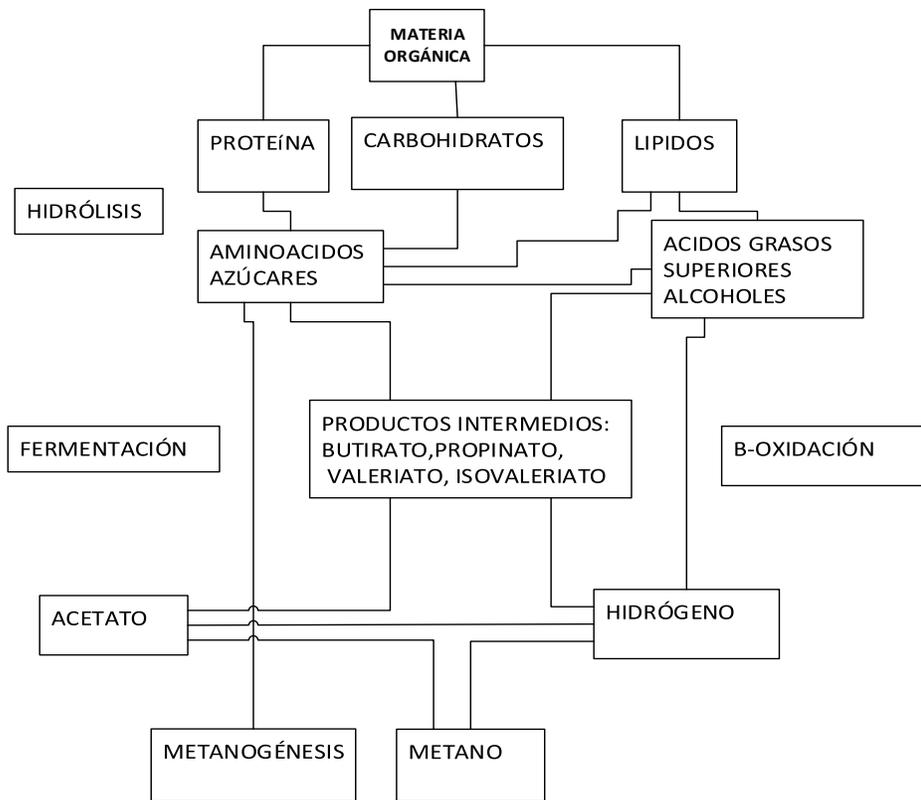


Figura 1.1 Proceso de digestión anaerobia
Pavlostathis y Giraldo Gómez 1991

1.1.4.1 Hidrólisis

La hidrólisis consiste en una transformación controlada por enzimas extracelulares en la que las moléculas orgánicas complejas y no disueltas se rompen en compuestos susceptibles de emplearse como fuente de materia y energía para las células de los microorganismos. (Mata-Álvarez et al., 2003)

1.1.4.2 Acidogénesis o fermentación

Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que pueden ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas acético, fórmico, H₂) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias Acetogénicas en la siguiente etapa del proceso. La importancia de la presencia de este grupo de bacterias no sólo radica en el hecho que produce el alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, si no que, además eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema (Manual del biogás, 2011).

1.1.4.3 Acetogénesis

Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos (H₂ y acético), otros (etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados en productos más sencillos, como acetato (CH₃COO⁻) e hidrógeno (H₂), a través de las bacterias acetogénicas. Representantes de los microorganismos acetogénicos encontramos a: *syntrophomonas wolfei* y *syntrophobacter wolini*.

Un tipo especial de microorganismos acetogénicos, son los llamados homoacetogénicos. Este tipo de bacterias son capaces de crecer heterotróficamente en presencia de azúcares o compuestos monocarbonados (como mezcla H₂/CO₂) produciendo como único producto acetato. Al contrario que las bacterias acetogénicas, éstas no producen hidrógeno como resultado de su metabolismo, sino que lo consumen como sustrato. Según se ha estudiado, el resultado neto del metabolismo homoacetogénico permite mantener bajas presiones parciales del hidrógeno y, por tanto, permite la actividad de las bacterias acidogénicas y acetogénicas. (Manual del biogás, 2011).

1.1.4.4 Metanogénesis

Es la etapa final de la digestión anaerobia donde se efectúa la formación de metano por parte de las bacterias metanogénicas, se conocen alrededor de 20 especies, entre las más sensibles al oxígeno, las cuales son: *methanobacterium*, *methanobacillus*, *Methanococcus* y *Methanosarcina*. Estas bacterias son las que se encargan de transformar el hidrogeno, dióxido de carbono y acetato en Metano. (Mata-Álvarez et al., 2004)

La formación de CH₄, producto final de la digestión anaerobia está limitado a tres tipos de precursores: CO₂ (dióxido de carbono), compuesto que contengan un grupo metilo y acetato (Liu y Whitman, 2008). Todos los metanógenos son estrictamente arqueas (dominio *archaea*) que pertenecen al *Phylum Euryarchaeota*. Aunque las arqueas son organismos muy antiguos, su existencia fue evidencia cuando Béchamp y Popoff descubrieron su existencia en el siglo XIX gracias a la formación de gas metano debido a la actividad microbiológica. (Liu y Whitman, 2008).

Cuando la metanogénesis es medida por el CO₂ como precursor se denomina hidrogenotrófica o hidrogenófila y se utiliza H₂ como principal donador de electrones (Liu y Whitman, 2008; Baserbal et al., 2012). Se ha demostrado que un 70% del metano producido en los reactores anaeróbios se forma a partir de la decarboxilación de ácido acético, a pesar de que, mientras todos los organismos metanogénicos son capaces de utilizar el H₂ como aceptor de electrones, sólo dos géneros pueden utilizar acetato. Los dos géneros que tiene especies acetotróficas son *methanosarcina* y *methanothrix*. El metano restante proviene de los sustratos ácido carbónico, ácido fórmico y metanol. El más importante es el carbónico, el cual es reducido por el hidrógeno, también producido en la etapa anterior. (Mata-Álvarez et al., 2004)

1.1.5 Factores que influyen a la digestión anaerobia

El proceso de digestión anaerobia se considera complejo ya que involucra 3 etapas limitantes, hidrólisis, acidogénesis, y metanogénesis. Sin embargo se ha buscado la manera de disminuir la inhibición entre etapas aplicando algunos pre-tratamientos para facilitar la hidrólisis, amortiguar la disminución de pH por la acumulación de intermediarios y facilitar la generación de metano (Nguyen et al., 2007). Los parámetros ambientales y operacionales son factores que influyen a la digestión anaerobia, la cual se tiene que controlar, haciendo referencia a condiciones que deben mantenerse para el desarrollo del proceso.

Dichos factores que afectan a la digestión anaerobia y se deben tener en consideración son:

- temperatura
- pH y alcalinidad
- relación carbono-nitrógeno
- Codigestión
- tiempo de retención hidráulico
- carga orgánica.

1.1.6 Clasificación de la digestión anaerobia

Existen diferentes criterios para la clasificación de la digestión anaerobia, generalmente en función de las condiciones de operación, las más frecuentes se clasifican de acuerdo al proceso, en función de la temperatura. Sin embargo, también se pueden clasificar de acuerdo a la carga orgánica tratada, el número de digestores empleados en el proceso y el tipo de sustrato, el cual se puede observar las diversas clasificaciones de la digestión anaerobia en la (Tabla 1.1) citada a continuación.

Tabla 1.1 Diversas clasificaciones de la digestión anaerobia.

Criterio	Clasificación
Temperatura	Psicrofílica Mesofílica Termofílica
Carga orgánica	Baja Media Alta
Número de etapas	Una sola etapa Dos etapas Multi- etapa
Tipos de sustrato	Aguas residuales Lodos residuales Residuos sólidos orgánicos Combinación de los anteriores

1.1.7 Productos finales de la digestión anaerobia

El resultado del proceso de digestión anaerobia, trabajando en sistemas de alta carga orgánica y en mezcla completa, son el biogás y un efluente estabilizado o también llamado biosólidos. (Mata-Álvarez et al., 2004)

El biogás es una mezcla gaseosa formada, principalmente, por metano y dióxido de carbono y pequeñas proporciones de H_2S , H_2 , NH_3 , etc. La composición o riqueza del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. En términos generales el biogás puede ser obtenido de las aguas residuales orgánicas y de residuos sólidos.

1.1.8 Características del biogás

El biogás es el producto gaseoso de la digestión anaerobia de compuestos orgánicos. Su composición, que depende del sustrato digerido y del tipo de tecnología utilizada, puede ser:

50-70% de metano (CH_4).

30-40% de anhídrido carbónico (CO_2).

+,- 5% de Hidrogeno (H_2), ácido sulfhídrico (H_2S) y otros gases.

Debido a su alto contenido en metano, tiene un poder calorífico algo mayor que la mitad del poder calorífico del gas natural. Un biogás con un contenido en metano del 60% tiene un poder calorífico de de 5.500 Kcal/Nm³ (6.4 kWh/Nm³). (Manual del biogás, 2011)

1.1.8.1 Uso del biogás

El biogás producido en procesos de digestión anaerobia puede tener diferentes usos, entre ellos podremos encontrar lo siguientes:

En una caldera para la generación de calor o electricidad, En motores o turbinas para generar electricidad, En pilas de combustibles, previa realización de una limpieza de H_2S y otros contaminantes de las membranas.

Purificarlo y añadir los aditivos necesarios para introducirlo en una red de transporte de gas natural, Usado como material base para la síntesis de productos de elevado valor añadido como es el metanol o el gas natural licuado.

El biogás, además de metano tiene otra serie de compuestos que se comportan como impurezas, estas pueden ser: agua, sulfuro de hidrogeno, monóxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles como hidrocarburos halogenados, etc. Por tanto, es

necesaria la limpieza del combustible, dependiente del uso final. (Manual del biogás, 2011)

1.1.9 Digestión de aguas residuales

En la depuración de aguas residuales mediante procesos anaerobios, es indispensable el desacoplamiento del crecimiento de las bacterias anaerobias, que tienen una tasa de producción de hasta 5 días, del tiempo de retención hidráulica del reactor; ya que es la única forma de evitar la pérdida total de la asociación microbiana por la dilución constante.

La digestión de aguas residuales con un tanque de hidrólisis para acidificación rápida, y un reactor con empaques (filtros anaerobios), es decir, en dos etapas, es muy eficiente, ya que brinda una superficie apta para el crecimiento de los microorganismos, permitiendo así tiempos de retención hidráulica de 6 horas. Los reactores de tipo UASB (upflow anaerobic sludge Blanket por sus siglas en inglés) retienen biomasa en forma de gránulos a través de campanas de separación en la parte superior del reactor.

La formación de dichos gránulos está sujeta al tipo de sustrato, el cual debe tener un bajo contenido de materia orgánica sedimentable. La principal condición de factibilidad para el uso de la digestión anaerobia como operación de tratamiento de aguas residuales es que la demanda química de oxígeno (DQO) sea mayor que 800 mg /L en el agua residual a tratar.

1.1.10 Sistemas de dos etapas

Estos sistemas consisten en un primer reactor con un elevado tiempo de retención, en el cual favorece la hidrólisis, seguido de un reactor de bajo tiempo de retención que digiere la materia orgánica disuelta y los ácidos producidos en la primera etapa. Este sistema permite mantener fácilmente la temperatura en el reactor discontinuo,

controlando la temperatura del efluente del segundo reactor. Ha sido aplicado con éxito para tratamiento de residuos sólidos cuya etapa limitante es la hidrólisis, el cual estos residuos son: frutas, verduras, residuos sólidos urbanos, de ganado vacuno, etc.

1.1.11 Sistemas de dos fases

A diferencia de los sistemas de dos etapas, la separación de fases se refiere a mantener dos reactores en serie, en los cuales se realizan, respectivamente, las fases de acidogénesis y metanogénesis. Su objetivo es conseguir un tiempo de retención global inferior al correspondiente a un único reactor de mezcla completa.

La separación es de tipo cinético, controlando el tiempo de retención de cada reactor, el cual será inferior en el primero, debido a la más alta tasa de crecimiento de las bacterias acidogénicas. Este tipo de sistema ha sido aplicado con éxito a la digestión de residuos con alta concentración de azúcares y bajo contenido en sólidos, pero no para residuos con fibras y/o en general, sustratos complejos cuyo limitante es la hidrólisis.

1.1.12 Operación de digestores

Para la operación de los digestores anaerobios se debe tener en mente que la degradación de la materia orgánica se lleva a cabo en pasos consecutivos por la asociación microbiana donde un microorganismo depende de otro. Esto se debe a que subproductos generados por algún microorganismo son el sustrato para otro grupo de microorganismos, pero a su vez, podrían causar inhibición, cuando se presentan con concentraciones elevadas. Para llevar a cabo una operación correcta de los digestores, es importante cuidar los puntos débiles de la cadena, como la acetogénesis y la metanogénesis cuya estabilidad se evalúa con la concentración de los ácidos grasos volátiles y la concentración del dióxido de carbono en el biogás. (Brambilla, 2011; lili, 2011).

1.1.13 Residuos sólidos

La ley general del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), en el artículo 3º (fracción XXXII) define como residuo a todo aquel materias generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento de calidad, recolección, transporte, procesamiento y disposición final. Todo este conjunto debe ser efectuado bajo estricto apego, teniendo en cuenta cuestiones de salud pública, económicas, tecnológicas, estética, así como la conservación y el uso de recursos.

1.2 Generalidades de plantas de tratamiento de digestión anaerobia

Las plantas de tratamiento deben ser una serie de procesos unitarios integrados , las cuales, tanto las operaciones físicas, químicas y biológicas se encuentren bien diseñadas para cada uno de los casos, la cual, se basa esencialmente en el conocimiento de su origen, así como características de los objetivos del tratamiento previamente bien planeados y tomando en cuenta futuras ampliaciones o límites de calidad de vertido más estrictos, lo cual deben ser capaces de soportar una gran variedad de condiciones de operación y cumplir con la exigencias de un funcionamiento ya establecido.

La digestión anaerobia de los residuos o también conocida biometanización, la cual consiste en la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno, de esta manera se obtienen dos productos; uno es el biogás, que puede utilizarse para producir energía eléctrica, así como digesto de materia orgánica, este tipo de tratamiento debe ir precedido de un tratamiento de clasificación y seguido de un proceso de compostaje para la estabilización del digesto.

Por tal motivo , con el objetivo de evaluar la eficiencia y reducir los costos de los tratamientos aplicados , se tomaron en consideración las nuevas herramientas tecnológicas desarrolladas como los simuladores de plantas de tratamientos o software de procesos , lo cual son de gran utilidad para la evaluación de los mismos, así como poder plantear, visualizar y analizar de manera más rápida y congruente los diseños de las plantas de tratamiento de digestión anaerobia (plantas de tratamiento de aguas residuales) PTAR o (plantas de tratamiento de lodos).

Estos dos procesos tanto el de tratamiento de aguas como el de tratamiento de lodos son iguales desde el punto de vista bioquímicos. Ya que estos dos procesos tienen las mismas etapas bioquímicas, sin embargo hay que tener en consideración concentración de sólidos, concentración de DQO (demanda química de oxígeno), los cuales los rendimientos se expresan en términos de STV (sólidos volátiles totales).

1.2.1 Plantas de tratamiento de aguas residuales

Dentro de las diferentes fuentes para la producción de biogás, también se encuentran las plantas de tratamiento de aguas residuales. De manera general, estas son estructuras construidas para procesar el agua residual antes de ser descargadas, cumpliendo con la normatividad vigente. En estos sistemas se lleva a cabo la conversión biológica por acción de microorganismo y una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tiene por objeto eliminar los contaminantes del agua.

El proceso de digestión anaerobia también esta presenta durante el tratamiento de aguas residuales, generando biogás, el cual, dado su valor energético, puede emplearse como fuente de energía en motores o micro turbinas dentro del mismo proceso. El tipo de tecnología para el tratamiento de aguas residuales es importante para la producción de biogás. Como ejemplo de tecnologías en el tratamiento de

aguas que generan biogás son las lagunas de estabilización y los lodos activados. (Metcalf & Eddy, 2003)

De acuerdo al inventario por la comisión nacional del agua (CONAGUA), en México existen 2,186 plantas en operación formal con una capacidad instalada de 126.8m³/s. Estas plantas procesan un causal de 93.6m³/s equivalente al 44.8% del total de aguas recolectadas en los sistemas formales de alcantarillado municipal (CONAGUA, 2011). El método más utilizado en el país para el tratamiento de aguas es el de lagunas de estabilización, aplicado en 723 plantas, equivalentes al 33% del total de las mismas. Le sigue el proceso de lodos activados el cual se aplica en 629 plantas, siendo 28.8% del total. En tercer lugar figura el proceso de RAFA (Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente), que se utiliza en 137 plantas, que equivalen al 6.3% del total nacional.

1.2.2 Legislación ambiental

En nuestro país, la evaluación, tratamiento y disposición final de las aguas residuales es regulada por la ley general del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, de conformidad con las Normas Oficiales Mexicanas y demás procedimientos que se establecen por la secretaria del medio ambiente y recursos naturales, encargada de emitir las normas que establecen los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales. Esta norma define como aguas residuales a la composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, domésticos, incluyendo también fraccionamientos. De igual manera, define como contaminantes a aquellos parámetros o compuestos que, en determinada concentración, pueden producir efectos negativos en la salud humana, así como el medio ambiente dañando la infraestructura hidráulica o inhibiendo los procesos de tratamiento de aguas residuales.

Actualmente, la norma oficial Mexicana vigente para aguas residuales que se descargan a sistemas de alcantarillado urbano y municipal es la NOM-002-ECOL-1996 (Complementada por la NOM-001-ECOL-1996, en cuanto se refiere a los límites máximos permisibles para DBO5 y SST), publicada en el Diario Oficial de la Federación el 3 de junio de 1998. Esta norma establece disposiciones que tendrán un cumplimiento gradual y progresivo conforme al rango de población, teniendo como referencia el IX censo de población y Vivienda.

1.3 Generalidades de la simulación

1.3.1 Conceptos básicos de la simulación

La simulación en nuestra actualidad es sin lugar a duda una herramienta importante, esto gracias a la computadora. Los simuladores o herramientas de simulación son utilizados para el diseño, análisis, control de sistemas de procesos y optimización. La optimización es un grupo de técnicas matemáticas, el cual se utilizar para obtener los mejores resultados y así poder escoger el idóneo, con el fin de obtener el mejor rendimiento del proceso.

Por lo anterior podremos entender que la simulación es el desarrollo de un experimento en un modelo generado para facilitar su manejo y lograr resultados en poco tiempo con gran economía. Una simulación matemática es una descripción de algún experimento realizado sobre un modelo matemático que representa al sistema físico estudiado. Por el cual, la simulación es una técnica actualmente disponible para el análisis del comportamiento aleatorio de un sistema, nosotros podemos llevar a cabo este proceso, involucrar diferentes interrelaciones que puedan existir o darse entre ellos, se debe tener en claro ciertos conceptos de simulación, para que este proceso pueda ser más fluido, dentro de los cuales podemos considerar:

Sistema: Estos se llevan a cabo mediante el control y distribución de los recursos de materiales, energía e información. El sistema tiene como característica primordial que puede ser observado, modificado y controlado.

Experimento: Es el proceso de obtener datos de un sistema mediante la manipulación de datos,

Modelo: Un modelo no significa programar en una computadora, un modelo también puede ser una maqueta o de manera más fácil entender cómo funciona un sistema, los modelos son codificados en programas computacionales. Existen diferentes tipos de modelos, entre los cuales, se encuentran:

Modelos físicos: Se basan generalmente en construcciones que representan en forma física un proceso real, pero a una escala que facilita de manera óptima su ubicación y operación.

Modelos matemáticos: Es el conjunto de ecuaciones, las cuales definen el comportamiento del sistema que se está estudiando, estos se encuentran fundamentados en las ya establecidas leyes físicas y químicas como pueden ser balances termodinámicos, másicos y energéticos, de cinética de reacción química entre otras.

1.3.2 Beneficios de la simulación

Con la ayuda de la simulación encontramos ciertos beneficios, la cual permite tener una idea más clara de los procesos en este caso de digestión anaerobia, entre los beneficios nosotros podemos encontrar:

La comprobación de la hipótesis: Esto derivado a la relativa facilidad con la que se lleva a cabo la “experimentación” sobre el proceso.

Accesibilidad en la entrada y salidas: Permite ejecutar simulaciones las cuales pueden salir del rango de experimentos que son aplicables al sistema real, lo que permite tener claro su máximo alcance.

Simplifica el proceso: Si no existe influencia externa. A diferencia del sistema real que usualmente está bajo la influencia de un gran número de entradas adicionales inaccesibles.

Comprensión del proceso: Como su nombre lo dice podremos comprender de manera más clara el proceso, dando como resultado poder emitir posteriormente estrategias para la mejora de operación y eficiencia del mismo, si es que se considera idóneo.

Bajo costo económico: de esta manera se evita gastos innecesarios, así como accidentes.

1.3.3 Simuladores computacionales

Los simuladores en la actualidad han desarrollado un papel muy importante, en la relación tiempo-costos, puesto que con ellos podremos simular, operar, cualquier parte del proceso o incluso diseñar una planta sin la necesidad de invertirle mucho tiempo y sobre todo lo más importante para las empresas el precio. Por lo tanto, podremos decir que los simuladores pueden clasificarse en dos grupos, uno es considerando el enfoque modular y el otro orientado a ecuaciones. (Batstone, 2006).

Este módulo en el simulador plantea un modelo matemático que representa dicha operación y contiene la siguiente información (1) Dimensionamiento del equipo, (2) Ecuaciones de balance de materia y energía, (3) Ecuaciones de flujo, (4) Información de las corrientes.

Los módulos tienen interconexiones con otros módulos para realizar el intercambio de información y puede arreglarse de manera específica para representar un proceso en particular.

Por otro lado, la simulación puede llevarse a cabo de 3 formas las cuales son: (1) estado estable, (2) Dinámico, (3) Estocástico.

Simulación Estado Estable: se asume las condiciones del efluente y la operación de la planta se mantiene en condiciones constantes a lo largo del día. En esta parte se realizan balances de materia y energía.

Simulación Dinámica: para este tipo de simulación el comportamiento del sistema respecto al tiempo.

El cual se involucran soluciones de cientos de miles de ecuaciones diferenciales, no lineales simultáneas.

Simulación Estocástica: Este tipo de simulación se encarga de predecir el comportamiento sobre la bases de funciones de probabilidad, basándose en datos históricos del proceso.

Inicialmente los simuladores en estado estable como los dinámicos utilizaban algoritmos de solución que podía ser secuencial-molecular o simultáneo. Sin embargo esta distinción empieza a desaparecer en los más recientes simuladores. El cual ninguno está orientado de modo integro.

1.3.4 Elección del software de simulación

El desarrollo de software para la simulación en procesos ambientales se ha desarrollado con fuerza en nuestra actualidad, esto debido a la gran utilidad que esto conlleva, con el fin de poder desarrollar, modificar o mejorar un proceso sin necesidad de invertir un alto capital para alguna parte del mismo que se desee evaluar. La simulación para tratamiento de aguas residuales asiste en la planificación, diseño y gestión para el mejoramiento y aprovechamiento óptimo de la planta por lo tanto se han desarrollado varios simuladores de procesos ambientales y de diferente tipo según sea el propósito que se busque. (Escudí et al., 2005)

1.4 Simulación de procesos ambientales

1.4.1 Simuladores comerciales ambientales

Desde hace ya varios años, la simulación empezó a ser ampliamente utilizada, inicialmente en computadoras analógicas esto, para realizar el análisis, diseño y control de procesos en la industria química, teniendo como principal objetivo representar menos gastos, una manera más fácil de utilización, reducir tiempos y en ocasiones poder generar mayor información que la experimentación a nivel laboratorio. En los últimos años esta práctica se ha venido extendiendo con un gran éxito al área ambiental, especialmente aplicada a la simulación de plantas de tratamiento de aguas residuales.

Comercialmente predominan los simuladores modulares, estos basan su éxito en el almacenamiento estructurado de modelos para cada una de las operaciones unitarias pre codificados por expertos en modelación, los cuales pueden ser utilizados en el momento que estos se requieran. Se presenta una lista de algunos simuladores más populares para procesos ambientales, así como una breve descripción: (Tabla 1.2)

Tabla 1.2 Simuladores comerciales ambientales

GPS-X	Ambiente de modelación modular para simulación al estado estable y dinámico de plantas de tratamiento, municipales e Industriales.
Simu Works	Simulador de vuelo para la formación avanzada y análisis de PTAR con mayor precisión, usando en industrias para prácticas de prueba y error en el proceso.
Toxchem	Simulador muy potente para contaminación atmosférica (aire) capaz de predecir y notificar emisiones toxicas.
Capdet Works	Simulador de diseño preciso y rápido para la estimación de costos de proyectos en la construcción de PTAR, basado en un modelado ASM1 así como los propuestos por Metcalf y Eddy.
WatPro	Simulador de aguas principal para la predicción de la calidad del agua sobre la base de los proceso de tratamiento específico y adición de compuestos químicos.

1.5 Simulador GPS-X

El simulador GPS-X, es un software con un medio de modelación avanzado, el cual se tiene conocimiento actualmente en lo que respecta a software de plantas de tratamiento. Este simulador incluye más de 250 modelos de procesos unitarios y permite al usuario incorporar los propios. Este potente simulador fue creado a mediados de 1991 por la compañía canadiense Hydromantis, la cual fue fundada en el año de 1985, y es propietaria hasta la fecha.

Hydromantis es una empresa líder a nivel mundial en el desarrollo y despliegue de las aguas residuales, así como software de la planta de tratamiento de aguas. Desde el

diseño de la planta, cálculo de costos, optimización y análisis de la capacidad de reducción de energía, informes regulatorios y más.

El simulador GPS-X en su versión 6.2 es capaz de operar procesos en estado estacionario y dinámico.

El operador selecciona de la librería los procesos unitarios y crea su propio esquema de PTAR (planta de tratamiento de aguas residuales). Después se seleccionan los modelos matemáticos para cada proceso, se introducen los datos físicos y operacionales de la planta, así como el flujo y la calidad de agua residual. Los resultados de la memoria de cálculo se envían a una hoja de cálculo en excel.

El simulador GPS-X es capaz de evaluar propuestas de diseño, operar una planta utilizando diferentes concentraciones DBO, DQO, TRS o TRC, como puede dejar fuera de servicio algún tren de tratamiento o proceso y ver como la planta podría ser operada.

1.5.1 Beneficios de elegir GPS-X

Flexibilidad: cuenta con diferentes procesos, así como diferentes librerías las cuales pueden aplicarse ampliamente a diferentes procesos de tratamiento de aguas residuales con diferentes combinaciones.

Diseño pre configurado y ejemplos: el usuario es capaz de diseñar su propio modelo basado en ejemplos como referencia a los que hacen un modelado simple, un ejemplo puede ser la remoción de fósforo el cual puede servir de utilizad como ejemplo.

Director de escenario y consistencia check: el simulador GPS-X proporciona la interfaz de usuarios amigable por lo que el usuario puede ahorrar más tiempo en la simulación dinámica.

Datos de grandes cantidades: se pueden guardar directamente en un archivo y luego, es realmente fácil el análisis de estos ya que el simulador nos permite exportar estos resultados a otros programas para su análisis como lo es excel.

Intercambio dinámico de datos: los datos se pueden vincular en servidores de clientes, pero necesitan códigos básicos visuales para la aplicación.

El modelo en tiempo real: los parámetros cinéticos biológicos se pueden identificar utilizando respirometría en línea y entrada en el simulador GPS-X para así dar un rendimiento del modelo más robusto.

La investigación de costo: investigar el potencial de ahorro de costos energéticos de control de oxígeno disuelto, usando estrategias de control dan datos reales del influente de forma dinámica, el cual es una parte de interés en el software, además de que la mayoría de los software comerciales se concentran en la mejora del rendimiento de la planta únicamente y olvidan el análisis económico de la misma.

1.5.2 Características del GPS-X

Este potente y usual simulador de la compañía canadiense Hydromantis cuenta con una interface de gráficos muy avanzada y amigable en algunas de sus líneas, alguna de sus funcionalidades importantes son:

- múltiples modelos disponibles
- simulaciones interactivas
- Simulaciones automatizadas.
- visualización gráfica de resultados.
- recursos de simulación completos
- escenarios de simulación
- Programas de operaciones en procesos por lotes
- herramienta de análisis
- formas de datos simplificadas
- fortran incluido
- estimación de máxima probabilidad

- filtros de datos adaptados
- personalización multinivel
- estimación de parámetros dinámicos
- conversión de unidades
- comunicación con otras aplicaciones
- módulo de control avanzado
- ayuda en línea
- tablero de dibujo característico y amigable
- biblioteca completa de modelos de procesos
- interfaz de simulación simplificada
- nuevo modelo biológico integral Mantis2

1.5.3 Librería del GPS-X

El simulador GPS-X contiene librería de desarrollo, lo cual en una colección de diversos modelos de procesos de aguas que usan un conjunto de componentes básicos de agua residual o variables de estado. El término variables de estado se refiere a las variables básicas que están continuamente integradas sobre el tiempo: constante, las variables que la componen son calculadas a partir de las variables de estado. Las librerías con las que dispone el GPS-X son las que se muestran en la figura 1.2.

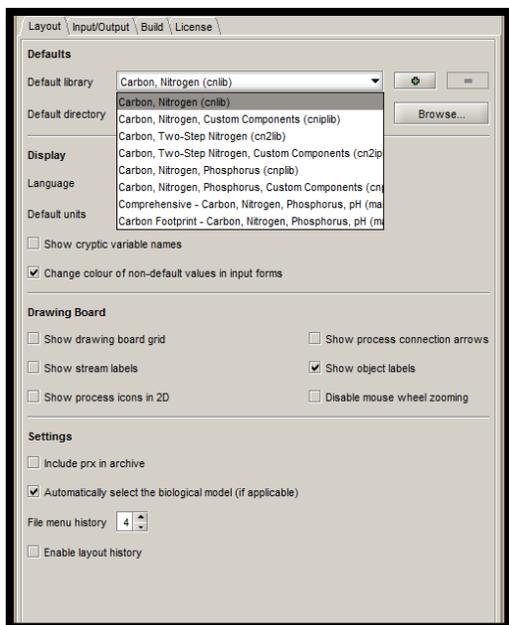


Figura 1.2 Librería del GPS-X versión 6.2

- carbono, nitrógeno (NNLB)
- carbono-nitrógeno-contaminante industrial (CNIPLIB)
- carbono – nitrógeno – contaminante industrial
- carbono –nitrógeno-fósforo (CNPLIB)
- carbono-nitrógeno-fósforo- contaminante industrial (CNPIPLIB)
- carbono avanzado – nitrógeno (CN2LIB)
- nitrógeno de carbono avanzada (CN2IPLIB)
- carbono-nitrógeno-fósforo de nitrógeno pH (MANTIS2LIB)

En tratamiento de aguas residuales la librería CN está diseñada para plantas de tratamiento de aguas municipales, utilizando la simulación para procesos anaeróbicos desatendidas a este tipo de plantas de tratamiento. La librería CNP y CN2IP están disponible en este paquete educativo, se elige la biblioteca CNP en lugar de CN2IP la cual está enfocada preferentemente a los desechos industriales. En la biblioteca CNP

nosotros podremos simular la eliminación de carbonos, nitrógeno y fosforo en las aguas residuales. Básicamente, la variable de estado y las variables de compuesto se utilizan en toda la biblioteca, pero la diferencian es las diferentes variables que fueron asignadas para cada una de ellas.

GPS-X es un software de simulación dinámica el cual contiene una colección de variables de estado de aguas residuales usando modelos de procesos (componentes básicos de aguas residuales) y se refiere a la variable que se integran continuamente con el tiempo, las variables del compuesto son aquellas variables que se calculan a partir de la variable de estado, el cual la podremos encontrar en la biblioteca CNP, el simulador cuenta con un total de 25 variables de estado y 15 variables compuestas que se muestran en las siguientes dos tablas 1.3 y 1.4, referentes a la librería CNP, variables de estado y CNP biblioteca de variables compuestas respectivamente, las cuales podemos observar a continuación:

Tabla 1.3 Librería CNP, variables de estado

	Variables de estado	Símbolos GPS-X
1	Orgánicos inertes solubles	Si
2	Sustrato(soluble) fácilmente biodegradable	Ss
3	Partículas orgánicas inertes	Xi
4	Sustrato (almacenado de partículas) lentamente biodegradable	Xs
5	Biomasa heterótrofa activa	Xbh
6	Biomasa autótrofa activa	Xba
7	Partículas un biodegradables de descomposición celular	Xu
8	Oxígeno disuelto	So
9	Nitrito y nitrato N	Son
10	Amoniacó libre y ionizado	Snh
11	Nitrógeno orgánico soluble biodegradable	Snd
12	Partículas de nitrógeno orgánico biodegradable	Xnd
13	Biomasa de polifosfato acumulado	Xbp
14	Poli-hidroxi-alcanoatos (PHA)	Xbt
15	Polifosfato almacenado	Xpp
16	Ácidos grasos volátiles	Slf
17	Fósforo soluble	Sp
18	Alcalinidad	Salk
19	Dinitrógeno	Snn
20	ONU Nitrógeno orgánico soluble biodegradable	Sin
21	Sustrato fermentable fácilmente biodegradable	Sf
22	Glucógeno almacenado	Xgly
23	Polifosfato almacenado (libre)	Xppr

Tabla 1.4 CNP biblioteca de variables compuestas

	VARIABLES COMPUESTAS	SÍMBOLOS GPS-X
1	Nitrógeno soluble total (filtrada) Kjeidahl	NTS
2	Nitrógeno total Kjeidahl	NTK
3	Nitrógeno total	NT
4	Demanda química de oxígeno	DQO
5	Demanda química de oxígeno soluble (filtrado)	DQOs
6	Demanda química de oxígeno de partículas	DQOp
7	Demanda bioquímica de oxígeno máximo	DBO5
8	Última demanda bioquímica de oxígeno soluble (filtrada)	DBOS5
9	Demanda bioquímica de oxígeno de partículas	DBOx5
10	Demanda bioquímica de oxígeno máximo	DBO20
11	Demanda bioquímica de oxígeno soluble (filtrada) última	BODs20
12	Demanda bioquímica de oxígeno máximo de partículas	BODx20
13	Sólidos suspendidos totales	SST
14	Sólidos suspendidos volátiles	SSV
15	Sólidos suspendidos inorgánicos inertes	SSI

1.5.4 Modelos del proceso

Para la modelación, cada unidad de proceso es presentado por un modelo que refleja el comportamiento dinámico del proceso seleccionado. GPS-X es independiente de modelos, esto significa que no está limitado a un modelo de proceso específico, una gran variedad de modelos están disponibles para manejar procesos específicos. El GPS-X en su versión 6.2 cuenta con los siguientes modelos de proceso

- Modelos de crecimiento en suspensión
- Modelos de crecimiento unidos
- Modelo de sedimentación y flotación
- Modelo de filtración de arena
- Modelo de digestión anaerobia
- Otros modelos
- Modelos de costos

En general la modelación de plantas de tratamiento de aguas residuales de gran escala requiere de la evaluación de un gran número de parámetros. Afortunadamente muchos de los parámetros pueden ser medidos directamente, mientras que otros están basados en datos experimentales tomados de la diferente literatura. Esos parámetros que no se pueden ser medidos directamente o estimados de la literatura son aquellos que usualmente son determinados mediante técnicas de mejoramiento dinámico no lineales basados en registros actuales así como otros datos experimentales colectados en base a fines específicos en laboratorio o en la planta.

En general los requerimientos de datos recaen en alguna de las siguientes categorías: Datos físicos de la planta, incluyendo: diagrama de flujo de proceso (líneas de flujo, líneas de reciclo. By-pases. etc.), patrones de flujo (plugflow, reactores de tanque completamente mezclado, etc.). Detalles de colección y retiro de lodos (ubicación, como, cuando, etc.) dimensiones de los diversos reactores (longitud, ancho, profundidad).

Datos operacionales de la planta, incluyendo, flujo, variables de control (variables independientes) y variables de respuesta (variables dependientes).

Características del influente de aguas residuales, incluyendo: parámetros básicos de calidad del agua, fricciones orgánicas del influente, etc.

Parámetros cinéticos y estequiométricas del modelo para compuestos de nitrógeno y fosforo así como parámetros de sedimentación (primaria y secundaria).

Alguno de esos datos o parámetros varían considerablemente durante el transcurso de un día. (Variaciones diurnas de clima seco, o durante el algún cambio o problemática natural como puede ser una tormenta tropical o un huracán) mientras que otros permanezcan relativamente constantes. En la Tabla 1.5 nosotros podremos observar los diferentes modelos del proceso con el que cuenta el simulador GPS-X, el cual se cita a continuación.

Tabla 1.5 Modelos del proceso

Procesos	Modelos								
	Asm1	Asm3	Mantis	mantis	Two step	Asm2d	general	New	Mantis 2
Fermentación						x	x		x
Nitrificación / Desnitrificación	x	x	x	x	x	x	x		x
Desnitrificación aeróbica			x	x					
Sustratos aerobios		x							
COD							x		
2 pasos nitrificación / desnitrificación					x				x
NO ₃ para la síntesis			x	x			x		
Generación de alcalinidad	X	x	x	x	x	x			x
Alcalinidad (limitantes procesos de lodos)						x			
Remoción de fósforo biológico						x	X		x
Precipitación de la presión con metales hidroxilo						x			x
Dependencia de la temperatura	x	x	x	x	x	x	x		x
Ph									x
Calcio y magnesio ppt.									x
Anammox									x
methylothrop									x

Modelo states: este modelo es apropiado solo si se ha desarrollado una caracterización completa y las variables de estado del influente han sido calculadas

manualmente. En ese modelo se requiere de las variables de estado, las fracciones estequiométricas usadas para el cálculo de las variables compuestas.

Modelo badbased: si este modelo es seleccionado, hay que proporcionar DBO₅, el NTK, los sólidos suspendidos y las diversas fracciones estequiométricas en el influente usadas para calcular las correspondientes variables de estado del influente.

Modelo asm2: se puede usar exitosamente si el agua fue caracterizada usando DQO y sólidos suspendidos como componentes principales. Si se selecciona este modelo, se requieren como valores de entrada DQO, sólidos en suspensión y NTK de influente y varias fracciones estequiométricas. Se pueden especificar algunas variables de estado, pero normalmente tienen valores y son ignoradas.

Modelo iawprc: Está basado en el modelo de lodos activados N.1 de la IAWQ se enfoca en la variación en la cantidad de sólidos y del aceptor de electrones. Expresiones simples para representar procesos biológicos.

Modelo asm3: Este modelo es una implementación del modelo para lodos activados N.3 DE Gujer (1998) y su estructura es igual en cada detalle, tiene los mismos objetivos de modelación que el modelo IAWPRC , pero incluye además el almacenamiento de sustratos orgánicos.

Modelo mantis: es idéntico que el modelo iawprc a excepción de que introduce el proceso de desnitrificación aerobia y dos procesos adicionales de crecimiento, además de que los parámetros cinéticos están dependientes de la temperatura.

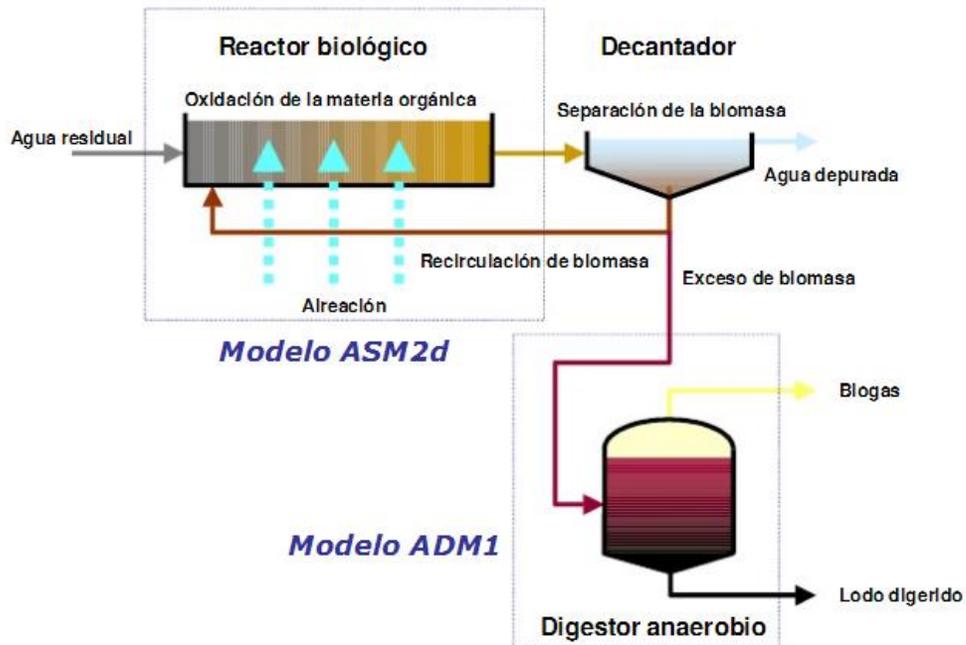


Figura 1.3 Ámbito de aplicación de los modelos ASM2D y ADM1 en sistemas de depuración de aguas

1.6 Modelos de digestión anaerobia

1.6.1 Modelo de digestión anaerobia ADM1

El modelo de Digestión Anaerobia (ADM1 por sus siglas en inglés) es un modelo estructurado que representa sustratos complejos por sus principales componentes, e incluye múltiples pasos que describen los procesos bioquímicos y fisicoquímicos del proceso anaerobio de biodegradación de compuestos orgánicos complejos.

El modelo ADM1 de digestión anaerobia en el GPS-X es un modelo básico el cual para el simulador describe el modelo básico asociado con el digestor anaeróbico. Que es una versión modificada del modelo desarrollado por Andrew (1969) y Andrew et al. (1971). Las modificaciones al modelo original son:

La adición de sensibilidad a la temperatura para la hidrólisis de sólidos volátiles en suspensión (SVS) y el crecimiento de organismos metanogénicos. La ecuación de Arrhenius se usa con la temperatura base de 35° celsius.

Los equilibrios químicos fueron modificados mediante la introducción de modelo pH de Hydromantis.

La introducción de material inorgánico inerte, este componente se mantiene sin cambios en el digestor y se introduce con el único propósito de evaluar su impacto en otros procesos posteriores del digestor, La adición de la degradación de sustancias tóxicas.

Este modelo (ADM1) creado por (Batstone et al 2002) se implementa en el simulador GPS-X de acuerdo con el Índice de referencia ADM1 de (Rosen y Jeppsson, 2002) el cual se realizaron cambios para asignarlos al simulador como se muestran a continuación:

Varias ecuaciones diferenciales que describen el equilibrio ácido-base del sistema (ecuación para S_{va} , S_{bu} , S_{pro} y S_{ab3}) se han convertido en las ecuaciones algebraicas, como se describe en (Batstone et al., 2002). Estos procesos son muy rápidos y contribuyen al sistema de ecuaciones diferenciales.

La ecuación diferencial para SH_2 se ha convertido a una ecuación algebraica para improvisar la velocidad de simulación. Este proceso es muy rápido y contribuye a la reducción del sistema de ecuaciones diferenciales. Este enfoque se describe por (Rosen et al., 2005).

Estos cambios aumentan sustancialmente la velocidad de solución de ADM1 en GPS-X y permiten un algoritmo de integración que no sea engranaje's rígidos para ser utilizados. Doble precisión aritmética debe utilizarse para resolver ADM1 en GPS-X.

El modelo estructurado incluye cinco pasos del proceso, incluyendo la desintegración, Hidrólisis, acidogénesis, Acetogénesis y metanogénesis. El modelo utiliza 32 variables

dinámicas estado, 6 procesos cinéticos ácido-base, 19 procesos bioquímicos, y 3 procesos de transferencia de gas -líquido.

El diagrama de flujo de materia ADM1 simplifica la muestra en figura 1.4 para obtener una descripción completa del modelo, se remite al lector a (Batstone et al., 2002).

Detalles de implementación se encuentran en (Rosen y Jeppsson 2002).

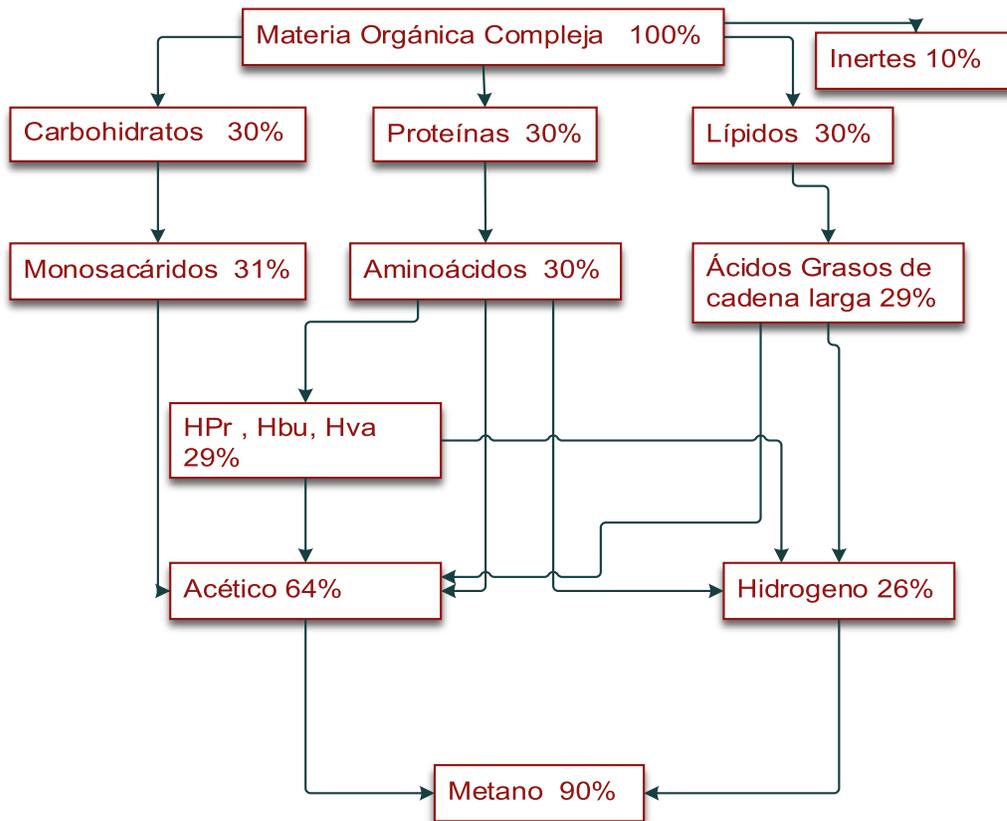


Figura 1.4 Diagrama de flujo simplificado ADM1

1.6.2 Utilización del modelo ADM1

Para el modelo ADM1 se pueden utilizar en dos diferentes tipos de escenarios como son:

Las corrientes del influente es representado por el objeto afluente. Este caso es más difícil y requiere que se especifique, el efluente en el objeto afluente y la forma influente en el objeto digestor. Ver. Fig. 1.5 para la descripción grafica de este procedimiento, la sección “SUGERENCIAS PARA LA CONFIGURACIÓN DEL MODELO ADM1” da sugerencias sobre cómo se puede caracterizar el afluente.

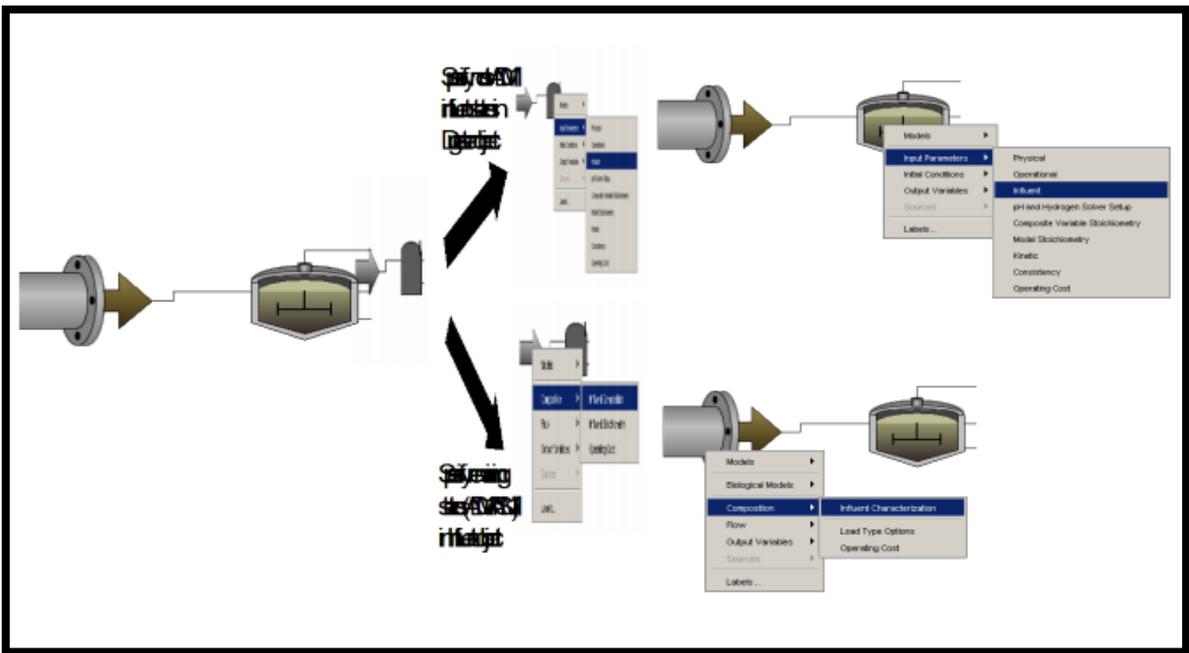


Figura 1.5 Sugerencias de caracterización del efluente

Las corrientes del afluente es un flujo de salida de otro objeto, este caso es más simple que el objeto que precede al digestor se hará cargo la caracterización de la corriente misma, aquí el usuario deberá todavía especificar los parámetros que se encuentran

en forma afluente del objeto digestor. Ver figura 1.6. Para una descripción gráfica de este procedimiento anaerobio.

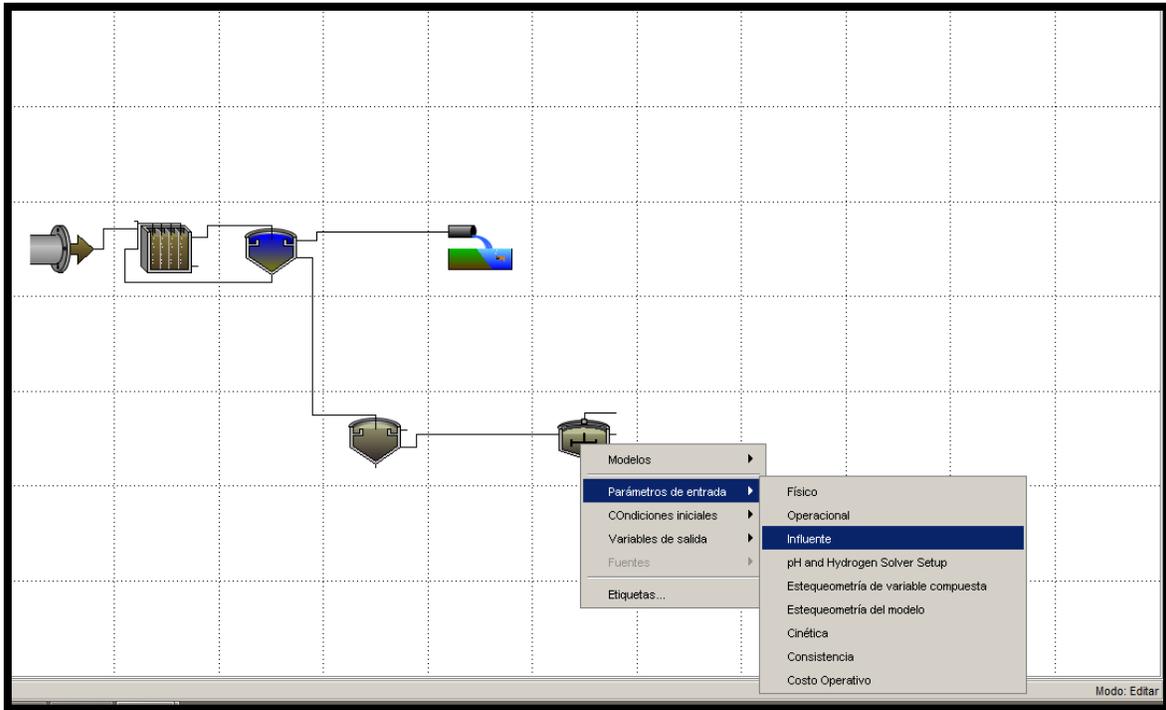


Figura 1.6 Descripción gráfica de un proceso anaerobio

CAPÍTULO II
MATERIALES Y MÉTODOS

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

En el siguiente capítulo se describen las actividades realizadas para obtener de primera instancia información necesaria para el desarrollo de la simulación. Se presentan las características de los efluentes donde se consideraron:

- 1) Caso real reportado. (Olmstead et al., 2012)
- 2) Planta de aprovechamiento de residuos sólidos urbanos del instituto tecnológico de Orizaba.
- 3) Características necesarias para realizar la simulación en GPS-X.

Se llevó a cabo la simulación y el análisis de resultados, como la comparación con los datos reportados previamente por (Magdaleno 2013), todo esto con el fin de evaluar las condiciones idóneas y el alcance de productividad del proceso actual para su optimización y mayor aprovechamiento del mismo.

Por último y no menos importante, se procedió a la validación de la simulación con el fin de determinar el cumplimiento del sistema, así como su eficiencia y los requerimientos que se desean obtener.

A continuación se muestra las 5 fases de la metodología:

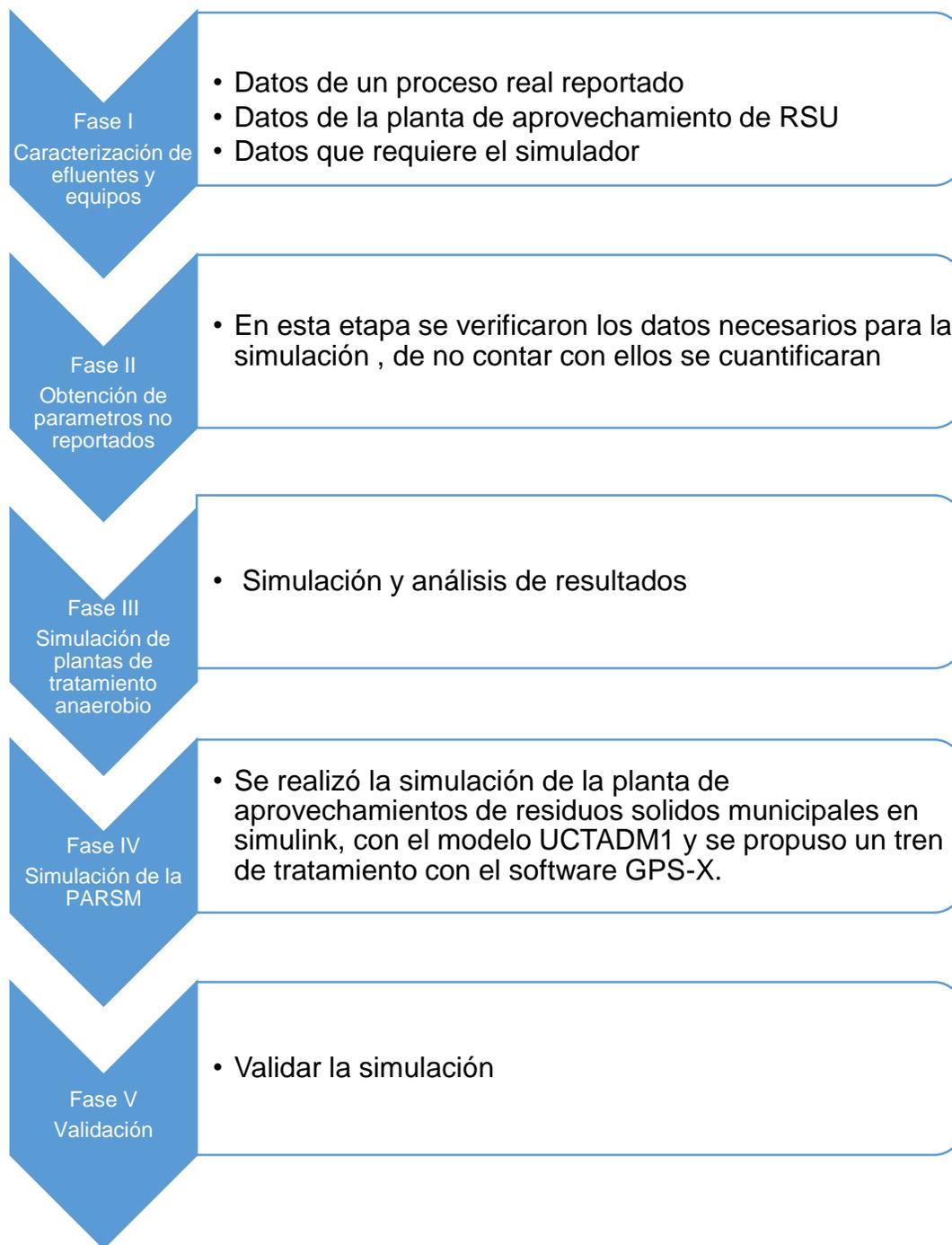


Figura 2.1 Metodologia

2.1 Primera Fase: Definición de las características de los efluentes y selección del equipo

Para conseguir el objetivo, se requirió la recolección de datos de diseño para alimentar el modelo. Sus características y sus parámetros cinéticos, así como estequiométricos para el ajuste de respuesta.

2.1.1 Obtención de datos de los efluentes y selección de equipo

Para una óptima recolección de datos sobre las características de los efluentes de forma clara y precisa, se tomó como punto de partida las siguientes consideraciones: Obtención de características de efluentes partiendo de un caso real y concreto, previamente establecido con similitudes al que nos compete, esta referencia se tomó del artículo: *control parameters in an activated anaerobic digestion with membrane filtration system realizado por S, J, Kang; K, P, Olmstead; O. Schraa, D, Rhu.* Por considerarse de gran importancia citar, ya que dicho artículo habla acerca de un sistema modelado con GPS-X de digestión anaerobia cumpliendo con un ejemplo real y apegado al sistema que se tiene. Partiendo de ello, se obtuvieron los siguientes resultados, tal y como se muestra en las tablas 2.1 y 2.2. De esta manera poder desarrollar nuestra simulación correspondiente a un caso real, con características que se asemejan a nuestra planta de aprovechamiento de residuos solidos organicos municipales.

Tabla 2.1 Caracterización del efluente de un caso de estudio real

Elemento	Efluente	unidades
Flujo	105	m^3 / d
DQO	88,800	mg / L
DQO	9,320	Kg / d
DQO's	12,000	mg / L
ST	100,00	mg / L
SV	60,000	mg / L
SST	78,000	mg / L
SSV	46,000	mg / L
Flujo del gas	21,000	m^3 / d
Flujo del gas CH₄	12,180	m^3 / d
DQO gas	29,880	kg / d
CH₄	58	%
CO₂	42	%
T	55	°C

Tabla 2.2 Caracterización del efluente

Elemento	Influente	unidades
Flujo	75	m^3 / d
DQO	500,000	mg / L
DQO	35,620	Kg / d

Obtención de las características de efluentes de la planta de aprovechamiento de RSU del Instituto Tecnológico de Orizaba.

Las características y diseño de la planta de aprovechamiento de residuos sólidos urbanos se obtuvo de la tesis de (Magdaleno, 2013). Los cuales se observaron condiciones del reactor EGSB y RLF1 mostradas en las tablas 2.3 y 2.4 como se muestran a continuación:

Tabla 2.3 Características del efluente de la planta de tratamiento en el reactor EGSB

EGSB	Entrada	Salida
Cva	2g DQO´s/L	
DQO´S	12.35g DQO/L*d	1.482
TRH	5 d	
ST	12g/L	6.5 g/L
STV	8.5g/L	1.8g/L
Vol. Flujo	400 L	
pH	5.5	
%CH₄		88%

Tabla 2.4 Características del efluente de la planta de tratamiento en el reactor RFLI

RFLI	Entrada	salida
Carga promedio	2gDQO´s/L	
DQO'S	7.5 g DQO/L	2.6gDQO/L
TRH	4 d	
ST	10 g/L	8g/L
STV	7 g/L	2g/L
Vol. Flujo	200 L	
pH	7.5	

Teniendo en cuenta las características de los influentes, como efluentes del proceso, el siguiente paso fue obtener los valores faltantes de la primera fase. Para el caso del reactor EGSB se buscó el volúmen de alimentación requerido para este reactor, el cual se obtuvo, partiendo de la ecuación:

$$Cva = \frac{DQO_{Entrada} * Vol.Alim entacion}{Vol.util} \quad \begin{array}{l} \text{Adimensionalidad} \\ = \frac{\frac{gDQO}{L} * \frac{L}{d}}{\frac{L}{1}} = gDQO / L * d \end{array} \quad (1)$$

Despejando:

$$DQO_{entrada} = \frac{Vol.Util * Cva}{Vol.Alim entacion} \quad (2)$$

Sustituyendo:

$$DQO_{entrada} = \frac{2470L * 2gDQO / L}{400L} = 12.35gDQO / L$$

Podemos observar en la tabla anteriormente citada, como en los valores obtenidos, que para el reactor EGSB se obtuvo una remoción del 88%, por lo que procedemos a calcular la entrada o el influente que se necesitó para su operación, despejando la fórmula original:

$$\% DQO_{removido} = \frac{(DQO_{entrada} - DQO_{salida})}{DQO_{entrada}} * 100 = \frac{DQO_{removido}}{DQO_{entrada}} * 100 \quad (3)$$

Despejando la obtenemos:

$$\% DQO_{salida} = \frac{(\% DQO_{removido} * DQO_{entrada})}{100} + DQO_{entrada} \quad (4)$$

Sustituyendo términos tenemos:

$$\begin{aligned} \% DQO_{salida} &= \frac{(88 * 12.35)}{100} + 12.35 \\ &= -10.36 + 12.35 \\ &= 1.482 \end{aligned}$$

Otros parámetros de operación necesarios de los reactores es obtener las características de diseño de los reactores de digestión anaerobia, las cuales podemos observar en la tabla 2.5 de esta tesis.

Tabla 2.5 Características de diseño de los reactores de digestión anaerobia

Parámetro	Unidad	EGSB	RLFI
CVA	gDQO/L	2	2
DQO s removido	%	88	67
V. alimentación	L	400	200
V. útil	L	2470	830
TRH	Días	5	4
V. Total	L	3530	1257

Los parámetros anteriores los podemos obtener de manera manual, como se realizó previamente en la obtención de la DQO's de entrada que se requería. Esto con el fin de evaluar el desempeño de eficiencia, la cual se considera necesaria tener en cuenta los siguientes factores operacionales descritos a continuación.

Carga volumétrica aplicada

Al llevarse a cabo el proceso de operación de reactores en fase es de gran importancia mantener un control de la carga volumétrica aplicada, el cual se pudo calcular tomando en consideración el volúmen de alimentación, la concentración orgánica, así como el volúmen útil del reactor, esta ecuación la expresamos a continuación:

(Ecuación 1).

$$Cva = \frac{DQO_{Entrada} * Vol.Alimentacion}{Vol.util} = \frac{\frac{gDQO}{L} * L}{\frac{L}{1} * d} = gDQO / L * d \quad (1)$$

Tiempo de retención hidráulica

El tiempo de retención hidráulica (TRH) es una medida el cual describe el tiempo promedio que cierto sustrato se encuentra en un digestor. En un reactor de mezcla continua, el contenido en el reactor tiene un relativo TRH el cual es uniforme. Considerando si el tiempo de residencia es corto, el sistema puede caer en un lavado, lo que ocasionaría un crecimiento lento de los microorganismos necesarios para el proceso anaerobio (Zaher et al., 2007). Si procedemos a reducir el TRH por ende reducimos el tamaño del digestor, el cual beneficiaría una disminución en el costo. Además que el contar un TRH menor eleva la velocidad de producción de biogás pero con la desventaja que disminuye la eficiencia en la degradación de materia orgánica, por lo cual esto ocasiona una disminución en la estabilidad del proceso.

$$TRH = \frac{\text{volumen_Util}}{\text{Vol.Alimentacion}} = \frac{L}{L/d} = \text{dias} \quad (5)$$

Monitoreo de los reactores anaerobios

El monitoreo de los reactores se realizó en base a los siguientes parámetros

Tabla 2.6 parametros de monitoreo

Determinación	Unidad	Método
DQO Soluble	g/L	Micro método colorimétrico 5220 (SM)
ST	g/L	Método Gravimétrico NOM-AA-34; 1981
STV	g/L	Método Gravimétrico NOM-AA-34; 1981
pH	--	método potencio métrico 4500-H+ B (SM)
Ácidos grasos volátiles	g/L	AGV´s por alcalinidad
Composición de biogás	%	Cromatografía de gases
Volúmen de gas	L/d	Medidor de flujo másico

Para determinar la composición del biogás, es necesario utilizar cromatografía de gases con detector de conductividad termica y columna empacada, para efectuar la cromatografía el equipo utiliza helio a una presión de 70 psi que se utiliza como gas de arrastre, se cuenta con una temperatura de columna de 36°C y valor del detector de 121°C, la dosis de inyección de la muestra de equipos es de 2mL.

Para medir el volúmen de gas producido se contó con un medidor de flujo másico, el cual tiene la capacidad de medir hasta 20 tipos de gases diferentes, arrojando valores como flujo, presión y temperatura.

Los porcentajes de remoción de DQO's, ST y STV son parámetros a considerar no menos importantes para su monitoreo, los cuáles los podemos obtener mediante la ecuación (6), (7) y (8) respectivamente.

$$\%Remoción\ DQOs = \frac{DQOs_{ENT} - DQOs_{SAL}}{DQOs_{ENT}} * 100 \quad (6)$$

$$\%Remoción\ ST = \frac{ST_{ENT} - ST_{SAL}}{ST_{ENT}} * 100 \quad (7)$$

$$\%Remoción\ STV = \frac{STV_{ENT} - STV_{SAL}}{STV_{ENT}} * 100 \quad (8)$$

Características fundamentales para la alimentación del modelo requeridas por el simulador GPS-X.

Las características fundamentales que se necesitó en el simulador para realizar la simulación apegada al modelo ADM1 las vemos reflejadas dentro de la figura 2.2 que se muestra a continuación.

Componentes del influente para el digestor anaeróbico				
[4] cationes	<input type="text" value="0.0"/>	mgCaCO ₃ /L	▼	
[4] aniones	<input type="text" value="0.0"/>	mgCaCO ₃ /L	▼	
[4] ácidos grasos con cadena larga	<input type="text" value="0.0"/>	mg/L	▼	
[4] valerato total	<input type="text" value="0.0"/>	mg/L	▼	
[4] butirato total	<input type="text" value="0.0"/>	mg/L	▼	
[4] propionato total	<input type="text" value="0.0"/>	mg/L	▼	
[4] acetato total	<input type="text" value="0.0"/>	mg/L	▼	
[4] hidrógeno(gas)	<input type="text" value="0.0"/>	mg/L	▼	
[4] metano(gas)	<input type="text" value="0.0"/>	mg/L	▼	
[4] proteínas	<input type="text" value="0.0"/>	mg/L	▼	
[4] biomasa que degrada el azúcar	<input type="text" value="0.0"/>	mg/L	▼	
[4] biomasa que degrada los aminoácidos	<input type="text" value="0.0"/>	mg/L	▼	
[4] biomasa que degrada los ácidos grasos con cadena larga	<input type="text" value="0.0"/>	mg/L	▼	
[4] biomasa que degrada el valerato y el butirato	<input type="text" value="0.0"/>	mg/L	▼	
[4] biomasa que degrada el propionato	<input type="text" value="0.0"/>	mg/L	▼	
[4] biomasa que degrada el acetato	<input type="text" value="0.0"/>	mg/L	▼	

Figura 2.2 Parámetros requeridos por el simulador GPS-X efluente

Como se puede observar en la (fig. 2.2) tomando en consideración las características de los efluentes de la planta de aprovechamiento de RSU reportados en el trabajo previo, como los parámetros requeridos por el simulador GPS-X podemos observar que dichos parámetros no se encuentran reportados. De esta manera se asoció a la siguiente parte de la metodología, que corresponde a la obtención de parámetros no reportados, estos parámetros pueden ser estimados o calculados. Los parámetros estimados son tomados de las consideraciones y sugerencias que nos proporciona el simulador para la obtención del mismo, el cual podremos encontrar en el anexo (A) de esta tesis. Complementando esta sección.

2.2 Segunda fase

Para este objetivo se tomó en cuenta las sugerencias proporcionadas por el simulador Gps-x, el cual se citó con anterioridad, así como saber las condiciones y ecuaciones con las que el modelo realiza el proceso de digestión anaerobia, este procedimiento los podremos observar a continuación.

2.2.1 Obtención de parámetros no reportados

Podremos realizar el procedimiento de manera manual, calculando estos parámetros podremos describirlo mediante las siguientes ecuaciones, proporcionados por el modelo ADM1 para la recreación de dichos parámetros.

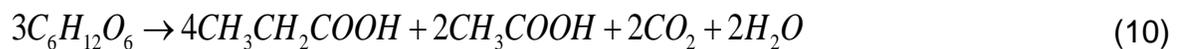
El modelo ADM1 considera que todos los monosacáridos están formados por glucosa (hexosa). La fructosa es energéticamente y estequiométricamente equivalente a la hexosa y la pentosa exhiben rendimientos estequiométricos similares con una unidad menos de CO₂ o ácidos carboxílicos producidos por mol de azúcar degradado.

Además el modelo ADM1 incluye acetato (S_{ac}), propionato (S_{pro}) y butirato (S_{bu}) como principales productos de la acidogénesis a partir de monosacáridos que se formarían a partir de las reacciones:

- 1) formación de ácido acético:



- 2) formación de ácidos acéticos y propiónicos



- 3) Fermentación butírica



Llamando $\eta_{1,su}, \eta_{2,su}, \eta_{3,su}$ a las fracciones de glucosa que se degradan mediante la primera, segunda y tercera reacción, respectivamente y teniendo en cuenta que $\eta_{1,su} + \eta_{2,su} + \eta_{3,su} = 1$, las masas de cada producto que se producirá por unidad de masa de glucosa degradada serian:

$$\text{Acetato} \quad \frac{S_{ac}}{S_{su}} = 0.67 * \eta_{1,su} + 0.22 * \eta_{2,su} \quad (12)$$

$$\text{Propionato:} \quad \frac{S_{pro}}{S_{su}} = 0.78 * \eta_{2,su} \quad (13)$$

$$\text{Butirato:} \quad \frac{S_{bu}}{S_{su}} = 0.83 * \eta_{3,su} = 0.83(1 - \eta_{1,su} - \eta_{2,su}) \quad (14)$$

$$\text{Hidrogeno:} \quad \frac{S_{bu}}{S_{su}} = 0.33 * \eta_{1,su} + 0.17(1 - \eta_{1,su} - \eta_{2,su}) \quad (15)$$

La velocidad el proceso se considera proporcional a la concentración de microorganismos degradados de azucares (X_{su}) con factores de limitación por la concentración de monosacáridos y nitrógeno inorgánico e inhibición por pH:

$$\rho_5 = K_{m,su} * \frac{S_{su}}{K_{S,su} + S_{su}} * \frac{S_{IN}}{K_{S,NH3} + S_{IN}} * X_{su} * I_1 \quad (16)$$

$$\rho_6 = K_{m,aa} * \frac{S_{aa}}{K_{S,aa} + S_{aa}} * \frac{S_{IN}}{K_{S,NH3} + S_{IN}} * X_{aa} * I_1 \quad (17)$$

Donde:

$K_{m,su}$ = velocidad específica de consumo de monosacáridos por microorganismos acidogénicos (d^{-1}).

$K_{S,su}$ = constante de semisaturación para los monosacáridos en el proceso de consumo por microorganismos acidogénicos ($kgDQO/m^3$)

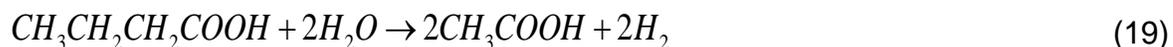
K_{S,NH_3} = parámetros de inhibición (limitación por sustrato secundario) para el nitrógeno inorgánico en los procesos biológicos ($KmolDQO/m^3$)

I_1 = factor de inhibición del proceso por pH.

$K_{m,aa}$ = velocidad específica de consumo de aminoácidos por microorganismos acidogénicos (d^{-1})

$K_{S,aa}$ = constante de semisaturación para los aminoácidos en el proceso de consumo por microorganismos acidogénicos ($KgDQO/m^3$)

La degradación de ácidos orgánicos de cadena larga con producción de acetato constituye una etapa de oxidación sin aceptores electrónicos internos, por consiguiente, los organismos oxidantes de ácidos orgánicos (bacterias principalmente), necesitan utilizar un aceptor adicional de electrones como dióxido de carbono o hidrogeniones para formar formato o hidrógeno molecular respectivamente:



El modelo ADM1 considera cuatro tipos principales de sustrato en procesos de acetogénesis

C3: propionato (S_{pro}), C4: butirato (S_{bu}), C5: valeriano (S_{va}), >c5: ácidos grasos de cadena larga (S_{fa}).

El modelo ADM1 considera que tanto el butirato como valeriano son degradados por el mismo grupo de microorganismos, mientras que el Propionato y los ácidos grasos de cadena larga son degradados por grupos específicos de microorganismos.

$$\rho_7 = K_{m,fa} * \frac{S_{fa}}{K_{S,fa} + S_{fa}} * \frac{S_{IN}}{K_{S,NH3} + S_{IN}} * X_{fa} * I_2 \quad (20)$$

$$\rho_8 = K_{m,c4} * \frac{S_{va}}{K_{S,va} + S_{va}} * \frac{S_{IN}}{K_{S,NH3} + S_{IN}} * X_{c4} * \frac{1}{1 + S_{bu} / S_{va}} * I_2 \quad (21)$$

$$\rho_9 = K_{m,c4} * \frac{S_{bu}}{K_{S,bu} + S_{bu}} * \frac{S_{IN}}{K_{S,NH3} + S_{IN}} * X_{c4} * \frac{1}{1 + S_{va} / S_{bu}} * I_2 \quad (22)$$

$$\rho_{10} = K_{m,pr} * \frac{S_{pro}}{K_{S,pro} + S_{pro}} * \frac{S_{IN}}{K_{S,NH3} + S_{IN}} * X_{pro} * I_2 \quad (23)$$

Donde:

$K_{m,fa}$ = velocidad específica de consumo de ácidos grasos de cadena larga por microorganismos acetogénicos (d^{-1})

$K_{s,fa}$ = constante de semisaturación para los ácidos grasos de cadena larga en el proceso de consumo por microorganismos acetogénicos ($kgDQO/m^3$)

I_2 = factor de inhibición del proceso por pH e hidrogeno gas.

$K_{m,c4}$ = velocidad específica de consumo de valerianato por microorganismos acetogénicos (d^{-1})

$K_{s,va}$ = constante de semisaturación para el valerianato en el proceso de consumo por microorganismos acetogénicos ($kgDQO/m^3$)

$K_{s,bu}$ = constante de semisaturación para el butirato en el proceso de consumo por microorganismos acetogénicos ($kgDQO/m^3$)

$K_{m,pr}$ = velocidad específica de consumo de propionato por microorganismos acetogénicos (d^{-1})

$K_{s,pro}$ = constante de semisaturación para el propionato en el proceso de consumo por microorganismos acetogénicos ($kgDQO/m^3$)

2.3 Tercera fase

Para lograr este objetivo planteado, se usó el simulador GPS-X, desarrollando plantas de tratamiento anaerobio, con el fin de aprender y tomar en cuenta los comportamientos del proceso anaerobio en la simulación, de esta manera, entender las condiciones de la simulación dinámica para transportar el análisis a la planta de tratamiento real y lograr una comparación, obteniendo una mejor perspectiva, además de una buena eficiencia de la planta de aprovechamiento de residuos sólidos

2.3.1 Simulación de una planta de tratamiento anaerobio

Las aplicaciones del ADM1 incluyen, entre otras, sistemas de tratamiento de aguas residuales, tratamiento anaeróbico de diversos sustratos y distribución de parámetros cinéticos y de variables para buscar una descripción más real del sistema físico.

La relativa facilidad de manipulación y la generalidad del modelo permiten la incorporación de fenómenos de inhibición, la consideración de la diversidad microbiana en el sistema, el acoplamiento con el modelo de lodos activados, la determinación de indicadores de estabilidad y otras técnicas novedosas que permiten mejorar la cualidades y ventajas del modelo.

Se ejecutó la simulación de una planta de tratamiento anaerobio en el simulador Gps-x tomando como base el siguiente proceso a continuación citado, correspondiente a la figura (2.3). *Control parameters in an activated anaerobic digestion with membrane filtration system realizado por S,J, Kang; K,P,Olmstead; O. Schraa, D, Rhu.*

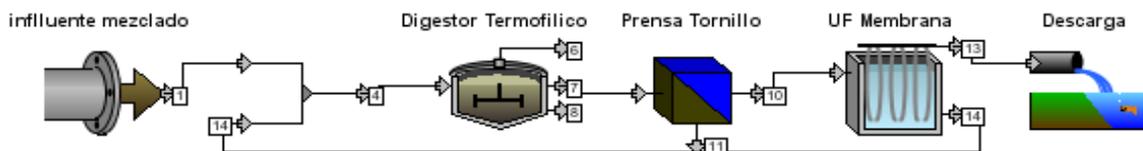


Figura 2.3 Tren de tratamiento de digestión anaerobia

El sistema que se representa en la figura anterior alimenta distintos estiércoles, incluyendo también maíz, trigo, como otros residuos orgánicos, esto fue enviado directamente al digestor anaerobio, todo mezclado en el digestor, operando bajo condiciones del modelo ADM1, se deshidrata a través de una prensa de tornillo para recuperar los sólidos y los nutrientes en una forma de lodo, este residuo se utiliza como fertilizante. A continuación el sobrante de la prensa tornillo se alimenta a una unidad de filtro de membrana. El cual utiliza un generador de vértice contra ensuciamiento con membranas planas, que permite que el sistema de membrana tome sólidos totales en el intervalo de hasta 5% debido al diseño y construcción, el sistema también puede tolerar altas temperaturas de hasta 90°C. Estas características son ideales para el tratamiento de digestión en el digestor anaerobio termofílico. Los sólidos retenidos, incluyendo los microorganismos del filtro de

membrana fueron devueltos al digestor como anteriormente se mencionó, el cual fue tratado por osmosis inversa.

El sistema de procesado constituye de 90 a 135 m³ / día (24.000 a 36.000 galones /día) de los residuos industriales, residuos agrícolas y estiércol de cerdo a través 3.000m³. El biogás a partir de este sistema se es utilizando para genera 4-6 MW de electricidad, el uso de membranas para el filtrado de biosólidos digeridos.

2.4 Cuarta fase

En esta fase de la tesis y casi final se llevó a cabo la simulación de la planta de aprovechamiento de residuos sólidos que se tiene en el I. T. O. (planta piloto) con el fin de poder visualizar el alcance idóneo que esta tiene, y obtener el mayor aprovechamiento a la misma.

2.4.1 Simulación de la planta de aprovechamiento de residuos sólidos

Esta cuarta etapa, constó de la simulación de la planta de aprovechamiento de residuos sólidos, se estudiaron previamente condiciones de operación en los puntos anteriores a esta tesis, con el fin de conocer nuestro proceso al llegar a esta etapa de la tesis.

Como podremos recordar los parámetros que necesitamos para el arranque o inicio de la simulación en esta fase es la obtención de los cationes, aniones, proteínas, ácidos grasos de cadena larga, siendo estos los valores que nos hacían falta para poder iniciar con el arranque de la simulación de la planta de tratamiento de residuos sólidos. Además de tomar en cuenta que nuestro influente será material orgánico (residuos orgánicos) proveniente del mercado de Rio Blanco, Veracruz.

Cuenta en su mayoría con: naranja, jitomate, lechuga, cilantro, zanahoria, chayote, col, plátano, entre otros, esta caracterización fue realizada en base a los residuos orgánicos con los que se trabajara, el reporte detallado se puede observar en el siguiente capítulo de esta tesis, además de compararlo con lo reportado por (Alvarado, 2011) y respaldados con lo anterior, se consideran los siguientes rubros para obtener dichos valores iniciales en nuestra simulación. Se apoyó de la página de nutrition fat para encontrar algunos parámetros requeridos dependiendo del residuo establecido. Considerando también lo referente a proteínas, este cálculo se basó en el ya conocido método de Kjeldahl y lo podemos observar a continuación:

$$\% N = \frac{14 * N * V * 100}{m * 1000} \quad (24)$$

$$\% \text{ proteina} = \frac{14 * N * V * 100 * \text{factor}}{m * 1000} \quad (25)$$

Donde:

V= 50mL H₂ SO₄ 0.1 N – gasto NaOH 0.1 de HCL 0.1 N

m : masa de la muestra en gramos

Factor= alimentos de origen animal: N= 6.25, alimentos de origen vegetal: N=5.70

Leche y derivados N=6.38

Hablando del cálculo para la determinación de grasas, también contamos con la fórmula ya establecida de soxhlet o también encontrada como método de soxhlet.

El cual lo podremos calcular mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ grasa} = \frac{m_2 - m_1}{m} * 100 \quad (26)$$

Dónde: m = peso de la muestra, m_1 = tara del matraz solo, m_2 = peso del matraz con grasa. Los resultados se reportan en % de materia grasa, promediando valores obtenidos y expresado el resultado con 2 decimales. (Este procedimiento se repite dos veces y no debe tener una diferencia superior al 2% del promedio)

2.4.2 Cálculo de la producción de metano

El contenido de DQO describe la cantidad de oxígeno necesario para oxidar completamente los residuos bajo condiciones aeróbicas.

La DQO se utiliza como una medida del equivalente de oxígeno de la materia orgánica contenido de una muestra que es susceptible a la oxidación por un fuerte oxidante químico (APHA, 1992).

El contenido sólidos volátiles describe el contenido de materia orgánica, y se define como la cantidad de elementos de una muestra seca que pierde después de 1 hora a una temperatura de aproximadamente 550°C en el aire (APHA 1992).

2.4.2.1 Determinación del potencial de metano mediante la ecuación de buswell

El potencial de metano (potencial bioquímico de metano), se define como la producción de metano específica para la degradación indefinida en un tiempo determinado. En la práctica el tiempo de degradación es definida y el potencial de metano se estima por extrapolación.

Puede expresarse:

- $l \text{ CH}_4 / \text{kg-residuos}$
- $l \text{ CH}_4 / l\text{-residuos}$

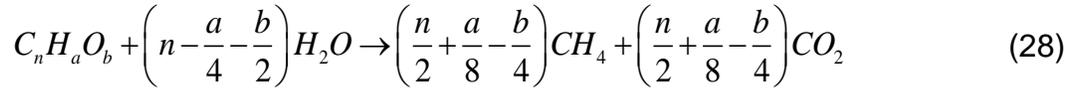
- I CH₄ / kg-VS
- I CH₄ /kg-DQO

Tabla 2.7 Parametros de monitoreo

Substrato	Composición	DQOV/VS	Producción CH4	Producción CH4	CH4
Tipo		g-DQO/g-VS	STP l/g-VS	STP l/g-DQO	(%)
Carbohidrato	(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n	1.19	0.415	0.35	50
Proteína*	C ₅ H ₇ NO ₂	1.42	0.496	0.35	50
Lípidos	C ₅₇ H ₁₀₄ O ₆	2.90	1.014	0.35	70
Etanol	C ₂ H ₆ O	2.09	0.730	0.35	75
Acetato	C ₂ H ₄ O ₂	1.07	0.373	0.35	50
Propionato	C ₃ H ₆ O ₂	1.51	0.530	0.35	58
*Nitrógeno es convertido a NH₃					

$$B_{O,th} = \frac{\left(\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4}\right) 22.4}{\left(n + \frac{a}{4} - \frac{b}{2}\right)} \left(STP \frac{lCH_4}{g - DQO} \right) \quad (27)$$

La ecuación de Buswell asume la producción de metano a partir de la degradación completa de un residuo con una composición elemental dada, donde C_nH_aO_bN_c representa la fórmula química del compuesto orgánico biodegradable sujeto al proceso de degradación anaerobia, por lo que la producción de metano considerado es la máxima estequiométricamente posible. Para un compuesto C_nH_aO_bN_c el potencial metanogénico teórico (en condiciones estándar de presión y temperatura) es, según Buswell:



2.4.2.2 Simulación de la planta de aprovechamiento de residuos sólidos mediante el modelo UCTADM1

Debido a que no se cuenta con la actualización del GPS-X se buscó una alternativa para poder realizar la simulación de la planta de aprovechamiento de residuos sólidos que se encuentra en el Instituto Tecnológico de Orizaba empleando el nuevo modelo propuesto UCTADM1, apoyando del software MATLAB en la librería Simulink. El cual se describió mediante ecuaciones diferenciales obtenidas y mostradas a continuación, que describen el proceso de degradación de la materia orgánica, como la obtención de metano, cumpliendo con el proceso de digestión anaerobia.

$$D_1 = \frac{dC_x H_y O_z N_A}{dt} = -1D_1 + S_{13}D_4 + S_{13}D_6 + S_{13}D_8 + S_{13}D_{10} \quad (29)$$

$$D_2 = \frac{dC_6 H_{12} O_6}{dt} = S_3 D_1 - \frac{1}{Y_{AD}} D_2 \quad (30)$$

$$D_3 = \frac{dH_2}{dt} = S_{10} D_3 + S_{16} D_5 - \frac{1}{Y_{HM}} D_9 \quad (31)$$

$$C_{13} = \frac{dH_{AC}}{dt} = S_8 D_3 + S_{15} D_5 - \frac{1}{Y_{AM}} D_7 \quad (32)$$

$$C_{28} = \frac{dHP_r}{dt} = -1C_{46} + 1C_{47} + S_9 D_3 - \frac{1}{Y_{AC}} D_5 \quad (33)$$

$$D_4 = \frac{dZ_{AD}}{dt} = 1D_3 - 1D_4 \quad (34)$$

$$D_5 = \frac{dZ_{AC}}{dt} = 1D_5 - 1D_6 \quad (35)$$

$$D_6 = \frac{dZ_{AM}}{dt} = 1D_7 - 1D_8 \quad (36), (37)$$

$$D_7 = \frac{dZ_{HM}}{dt} = 1D_9 - 1D_{10}$$

$$P_4 = \frac{dCH_4}{dt} = S_{18}D_7 + S_{20}D_9 \quad (38)$$

2.5 Validación

En esta fase se realizó la validación del modelo, por medio de una comparación de los resultados obtenidos en Simulink con lo reportado del modelo, de igual manera el modelo UCTADM1 se programó en aquasim (ver anexo C) de esta tesis, para validar lo desarrollado en Simulink considerando los datos obtenidos en la planta de aprovechamiento de residuos sólidos del instituto tecnológico de Orizaba.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CAPITULO III: RESULTADOS

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos de la metodología descrita en el capítulo anterior, la cual consiste en 5 fases para poder desarrollar esta Tesis.

- Fase I: Definición de las características de los efluentes y selección del equipo
- Fase II: Obtención de parámetros no reportados
- Fase III: Simulación de plantas de tratamiento anaerobio
- Fase IV: Simulación de la planta de Aprovechamiento de Residuos Sólidos Municipales.
- Fase V: Validación de la simulación

3.1 Primera fase: definición de las características de los efluentes y selección del equipo

En la primera fase se definieron las características de los efluentes correspondientes a la planta de aprovechamiento de residuos orgánicos del Instituto Tecnológico de Orizaba. Conocer la planta de aprovechamiento de residuos sólidos esto con el fin de saber el funcionamiento del mismo, la cual podemos observar en la figura 3.1

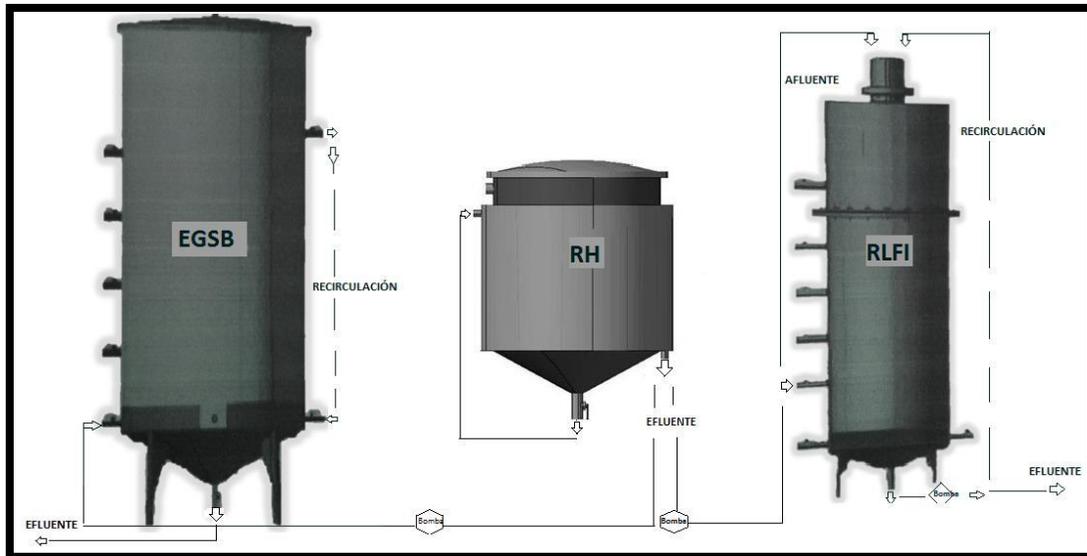


Figura 3.1 Planta de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos urbanos

Dicha planta era alimentada con residuos sólidos orgánicos municipales provenientes del mercado Zapata de esta ciudad de Orizaba Veracruz, la cual contaba con las siguientes condiciones de alimentación en el reactor de Hidrólisis y que podemos observar en la tabla 3.1. La cual alimentaba al reactor con 330kg / semana lo que equivale aproximadamente un 70% de fracción soluble. (Magdaleno 2013)

Tabla 3.1 Características de la fracción soluble de RSOM

Determinacion	Valor	Unidad
DQO total	33.4	(g/L)
DQO soluble	20.2	(g/L)
ST	30.21	(g/L)
STV	25.4	(g/L)
pH	3.6	(g/L)

Una vez conocido el tipo de equipo y de operación de la planta de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos (digestión anaerobia), como el flujo de entrada. Se procedió a identificar el efluente de nuestro sistema el cual se ve reflejado en la tabla 3.2 descrita a continuación:

Tabla 3.2 Características de los efluentes

EGSB	Entrada	Salida
Cva	2g DQO's/L	
DQO'S	12.35g DQO/L*d	1.482
TRH	5 d	
ST	12g/L	6.5 g/L
STV	8.5g/L	1.8g/L
Vol. Flujo	400 L	
pH	5.5	
%CH₄		88%

Tabla 3.2 Característica de los Efluentes: continuación

RFLI	Entrada	salida
Carga promedio	2gDQO's/L	
DQO'S	7.5 g DQO/L	2.6gDQO/L
TRH	4 d	
ST	10 g/L	8g/L
STV	7 g/L	2g/L
Vol. Flujo	200 L	
pH	7.5	

Para la parte de simulación de la planta de tratamiento se ocupó un digestor anaerobio operando bajo el modelo ADM1 correspondiente a digestión anaerobia, así como un tren de tratamiento alterno ya que la versión que se ocupara del GPS-X no cuenta con este tipo de reactor de Hidrólisis o EGSB, o RFLI, sin embargo se puede realizar adecuaciones que asemejan dicha funcionalidad de operaciones, las cuales se observan más adelante.

3.2 Segunda fase: Obtención de parámetros no reportados

Para poder desarrollar esta fase del proceso, se procedió a evaluar las condiciones que nos pide el simulador GPS-X para un reactor anaerobio, bajo el modelo ADM1 y de esta manera conocer los parámetros que no tenemos reportados de la planta. De esta manera podremos saber los requerimientos iniciales para realizar la simulación, el digestor anaerobio está representado en la figura 3.2, la selección del modelo ADM1 expresada en la figura 3.3

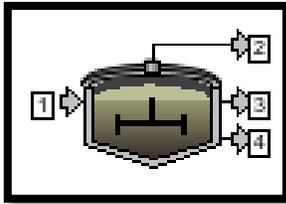


Figura 3.2 Digestor anaerobio



Figura 3.3 Selección del modelo ADM1

Componentes iniciales influente

Influente			
Componentes del influente para el digestor anaeróbico			
[3] cationes	<input type="text" value="0.0"/>	mgCaCO3/L	▼
[3] aniones	<input type="text" value="0.0"/>	mgCaCO3/L	▼
[3] ácidos grasos con cadena larga	<input type="text" value="0.0"/>	mg/L	▼
[3] valerato total	<input type="text" value="0.0"/>	mg/L	▼
[3] butirato total	<input type="text" value="0.0"/>	mg/L	▼
[3] propionato total	<input type="text" value="0.0"/>	mg/L	▼
[3] acetato total	<input type="text" value="0.0"/>	mg/L	▼
[3] hidrógeno(gas)	<input type="text" value="0.0"/>	mg/L	▼
[3] metano(gas)	<input type="text" value="0.0"/>	mg/L	▼
[3] proteínas	<input type="text" value="0.0"/>	mg/L	▼
[3] biomasa que degrada el azúcar	<input type="text" value="0.0"/>	mg/L	▼
[3] biomasa que degrada los aminoácidos	<input type="text" value="0.0"/>	mg/L	▼
[3] biomasa que degrada los ácidos grasos con cadena larga	<input type="text" value="0.0"/>	mg/L	▼
[3] biomasa que degrada el valerato y el butirato	<input type="text" value="0.0"/>	mg/L	▼
[3] biomasa que deorada el proopionato	<input type="text" value="0.0"/>	mg/L	▼

Figura 3.4 Componentes del influente para el digestor anaerobio

Estos parámetros pueden ser calculados o estimados, estas consideraciones las podremos encontrar en el anexo A de esta tesis.

También puede tomarse en cuenta concentraciones iniciales del digestor anaerobio si así se desea, de lo contrario el simulador cuenta con ciertas condiciones iniciales de operación estándar con la que opera de manera óptima un reactor anaerobio y el cual podremos observar en la figura 3.5

Concentraciones iniciales			
[3] metano inicial	<input type="text" value="50.0"/>		
[3] carbono inorgánico inicial	<input type="text" value="100.0"/>	mgCaCO3/L	
[3] nitrógeno inorgánico inicial	<input type="text" value="3200.0"/>	mgN/L	
[3] acetato total inicial	<input type="text" value="180.0"/>		
[3] propionato total inicial	<input type="text" value="15.0"/>	mgCOD/L	
[3] butirato total inicial	<input type="text" value="15.0"/>	mgCOD/L	
[3] valerato total inicial	<input type="text" value="10.0"/>	mgCOD/L	
[3] monosacáridos iniciales	<input type="text" value="10.0"/>	mgCOD/L	
[3] aminoácidos iniciales	<input type="text" value="5.0"/>	mgCOD/L	
[3] ácidos grasos de cadena larga iniciales	<input type="text" value="100.0"/>	mgCOD/L	
[3] materia soluble inerte inicial	<input type="text" value="5500.0"/>	mgCOD/L	
[3] materia compuesta inicial	<input type="text" value="5500.0"/>		
[3] carbohidratos iniciales	<input type="text" value="50.0"/>	mgCOD/L	
[3] proteínas iniciales	<input type="text" value="50.0"/>	mgCOD/L	

Figura 3.5 Concentraciones iniciales

Adicionalmente se desarrolló el modelo ADM1 de forma simplificada con el fin de entender el comportamiento que presenta dicho modelo en el proceso de digestión anaerobia. El modelo ADM1 tiene como objetivo crear una plataforma común para el desarrollo de simulaciones para un rango amplio de procesos específicos. A continuación se muestran las ecuaciones diferenciales obtenidas así como su desarrollo con la herramienta del Software MATLAB Simulink.

Ecuaciones Diferenciales del Modelo ADM1 simplificado

$$\dot{X}_1 = Y_1 Km,1 \frac{S_1}{K_s,1 + S_1} I_{pH} X_1 - aD(t)x_1 - Kdx_1 \quad (39)$$

$$\dot{S}_1 = D(S_1^i - S_1) - Km,1 \frac{S_1}{K_s,1 + S_1} I_{pH} X_1 \quad (40)$$

$$\dot{Q}_{CH_4} = (1 - Y_1) Y_{CH_4} Km,1 \frac{S_1}{K_s,1 + S_1} I_{pH} X_1 - Q_{CH_4} \quad (41)$$

Con

$$\mu_1 = \frac{Km,1 + S_1}{K_s,1 + S_1} I_{pH} \quad (42)$$

$$I_{pH} = \frac{1 + 2 * 10^{0.5(PHLL - PHUL)}}{1 + 10^{(PHLL - PHUL)} + 10^{(PHLL - pH)}} \quad (43)$$

Parámetros

$$Km,1 = 5.1 \quad Y_{ch_4} = 0.35$$

$$Ks,1 = 0.5 \quad pH_{LL} = 6$$

$$Kd = 0.02 \quad pH_{UL} = 8$$

$$Y_1 = 0.1 \quad a = 0.5$$

Muchas extensiones y modificaciones del ADM1 se han propuesto para mejorar sus estimaciones y aumentar su capacidad de manejar distintos sustratos sometidos a fermentación y no incluidos en el modelo original, tal es el caso del modelo UCTADM1.

3.3 Tercera fase: Simulación de plantas de tratamiento anaerobio

Para cumplir este objetivo planteado, se llevó a cabo la simulación de una planta de tratamiento anaerobio con el fin de operar condiciones similares a nuestra planta real de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, la cual se efectuó bajo el siguiente tren de tratamiento representado en la figura 3.6 y tomado *de control parameters in an activated anaerobic digestion with membrane filtration system*.

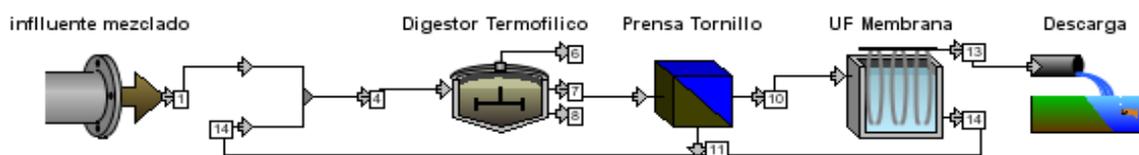


Figura 3.6 Tren de tratamiento de digestión anaerobia.

Este tren de tratamiento asemeja, las condiciones de operación correspondientes a nuestro proceso de la planta de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos ubicado en el Instituto tecnológico de orizaba. Sin embargo evaluando nuestro proceso de digestión anaerobia este opera bajo el modelo UCTADM1 incluido en la librería del simulador como MANTIS 2 en la versión del GPS-X 6.0, este modelo es un modelo mejorado del modelo ADM1 desarrollado por (Sotemann, 2005).

Este modelo introduce la representación genérica de lodo residual mediante la fórmula $C_xH_yO_zN_a$ efectúa la hidrólisis del lodo residual con glucosa como producto único, además de que introducimos la acidogénesis a alta y baja presión parcial de H_2 , lo que

a baja presión de H₂ logramos producir ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno, mientras que a alta presión de H₂, además de los intermedio anteriores producimos propiónico.

Las características principales del modelo MANTIS2, toma en cuenta:

- carbono, nitrógeno, fósforo y la eliminación de los procesos de digestión anaerobia integrados
- balance de masa para DQO, C, N, P, Mg, K y carga
- 48 variables de estado
- 56 procesos
- dos pasos de nitrificación usando AOB, NOB.
- dos pasos de desnitrificación
- proceso de desnitrificación de biomasa con metanol metil
- proceso ANAMMOX
- proceso de digestión anaerobia con modelo de fase gaseosa de N₂, CO₂, H₂, y CH₄
- pH y estimación de alcalinidad tanto para trenes de tratamiento liquido como solidos Precipitación de MgNH₄PO₄ , 6H₂O , CaCO₃ , MgHPO₄ , 3H₂O , CaPO₄, AlPO₄ , FePO₄ , Al(OH)₃ y Fe(OH)₃
- unificación del cálculo de las variables compuestas

El modelo MANTIS2, nos permite la estimación de pH, un estado de dos fases por lo que es posible de esta manera poder utilizar influentes adicionales como ácidos, alimentación alcalina para estimar la química requerida para ajustar el pH.

La estructura básica del modelo MANTIS2, se basa en el siguiente modelo publicado:

1. ASM2d – reacciones básicas para carbón biológico, nitrógeno y eliminación de fósforo

2. UCTADM1 - proceso de digestión anaerobia mejorado
3. Modelo Musvoto – procesos de precipitación inorgánicos

Entre sus diferencias con respecto al ya conocido modelo ADM1 encontramos la medición de nuestro influente en dos fases. El modelo UCTADM1 representa un compuesto genérico formado por carbono- Hidrogeno. Con la finalidad de poner glucosa en el proceso, el cual se debe a que solo se considera como un intermedio. Puesto que en el proceso de digestión anaerobia esta nunca se acumula, aunque realmente no todo se degrada en glucosa y para mantener el balance tanto de agua como de dióxido de carbono, se toma del líquido para generar glucosa. En el modelo UCTADM1 toma en cuenta la influencia de la presión parcial de hidrógeno en la acidogénesis y glucosa para poder formar acetato y propionato, de esta manera se pueden ingresar condiciones que causen fallas en el comportamiento de la digestión anaerobia.

Para poder ingresar esto el modelo se divide en dos procesos la acidogénesis (bajo-alto), así como condiciones de alta presión parcial de hidrogeno para la producción de propionato y baja presión parcial de hidrogeno para la formación de ácido acético. Lo anteriormente mencionado se puede observar en el siguiente esquema del modelo. (Ver Fig. 3.7)

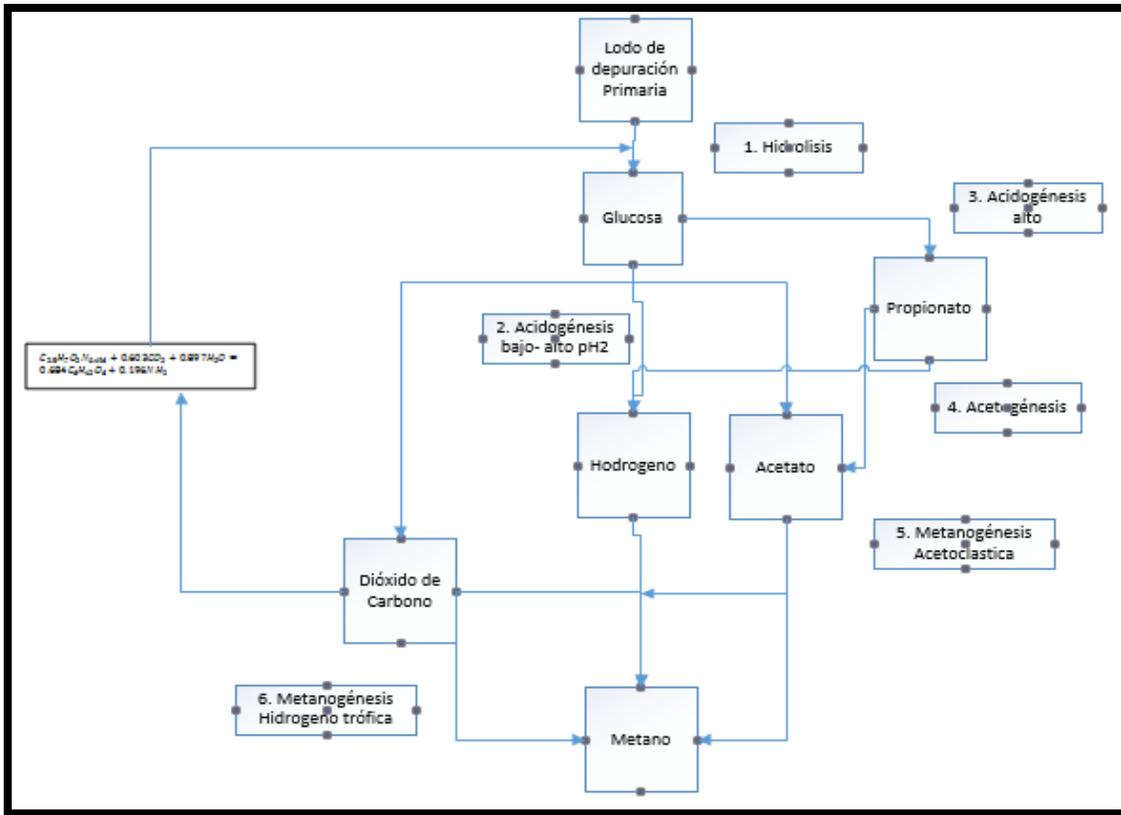


Figura.3.7 Diagrama de flujo del modelo UCTADM1

El modelado enfocado en dos etapas de nitrificación, desnitrificación, además de un paso de desnitrificación en metanol y ANNAMOX para la eliminación de nitrógeno, el cual se adoptan a partir de estudios de investigación reciente, dicha investigaciones fueron realizadas por (Sotemann, 2005) de la universidad de Cape Town en Sudáfrica e implementado en el simulador GPS-X en su versión 6.0 con el propósito de seguir mejorando y proponer nuevas alternativas para la simulación en digestión anaerobia.

Para simular este tren de tratamiento se ocupó el simulador GPS-X 5.0 que se tiene a disposición en el laboratorio de simulación ambiental de este instituto tecnológico de orizaba, aunado a lo anteriormente citado, y basados en el modelo ADM1 ya que esta versión del software no cuenta con la nueva modificación del modelo, la librería MANTIS2, se operó bajo las condiciones que ajustaron al modelo ADM1 y con

parámetros iniciales del MANTIS2, cabe mencionar de igual manera que se realizó la simulación dinámica a prueba y error con la finalidad de evaluar condiciones de operación idóneas para el tren de tratamiento y poder concluir dichos resultados y asemejar estas condiciones a la planta de aprovechamiento de residuos solidos urbanos..

Se inició operando el tren de tratamiento en condiciones Mesofílica (45°C) como lo requiere nuestra planta de tratamiento anaerobio, con un flujo de 143m³/d, pH correspondiente a 8.1 y un TRH de 100 días, el cual es un valor que se le asigno en el intervalo. A los 50 días se cambió las condiciones a un estado termofílico (55°C) y una reducción del flujo a 93m³/d y obtuvimos los siguientes resultados presentes en las siguientes graficas

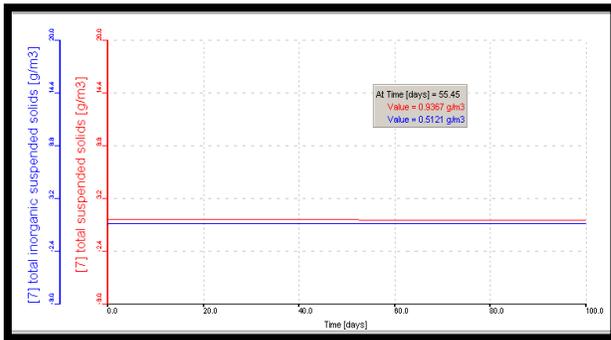


Figura 3.8 SSI vs SST

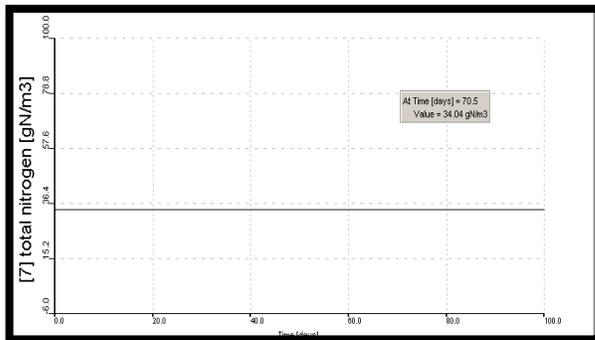


Figura 3.9 TN

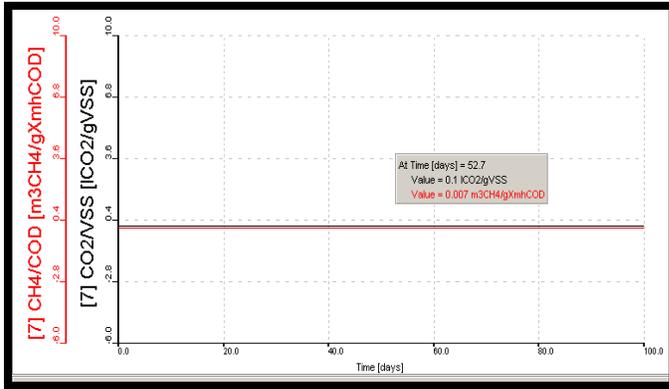


Figura 3.10 CH4/DQO vs CO2 / VSS

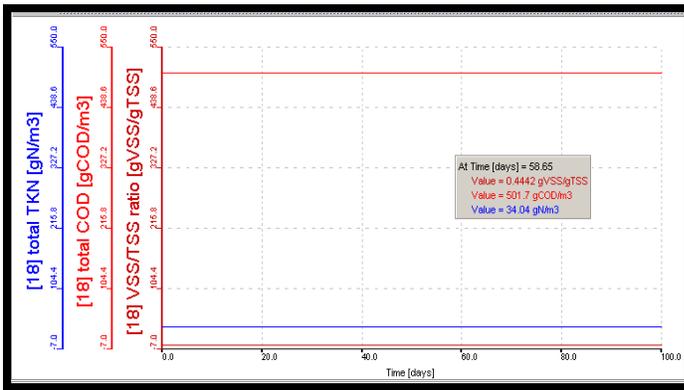


Figura 3.11 TKN vs DQO , vs Taza de VSS / SST

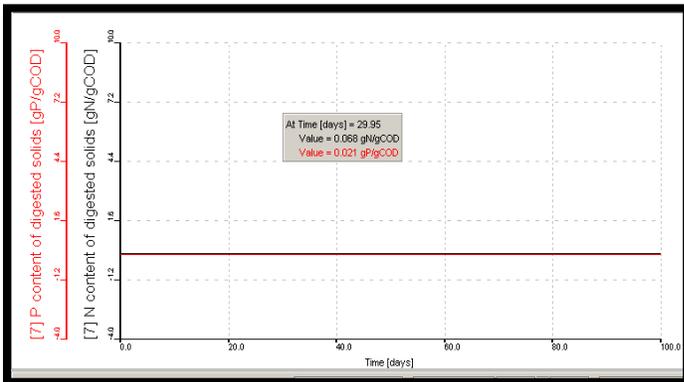


Figura 3.12 P cont. DS VS N cont Ds

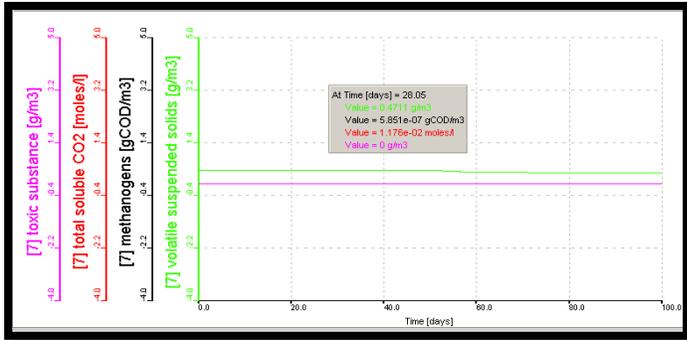


Figura 3.13 Substancias toxicas vs SSV

Se realizará lo mismo en condiciones termofílica (55°C), obteniendo los siguientes resultados.

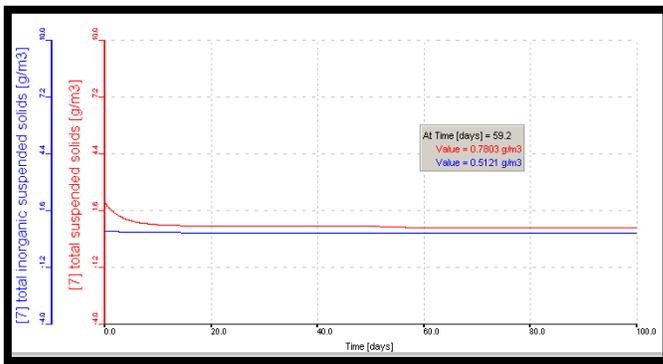


Figura 3.14 SSIT vs SST

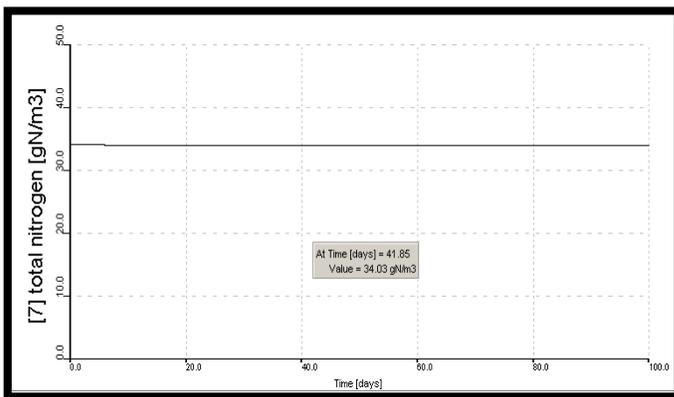


Figura 3.15 TN

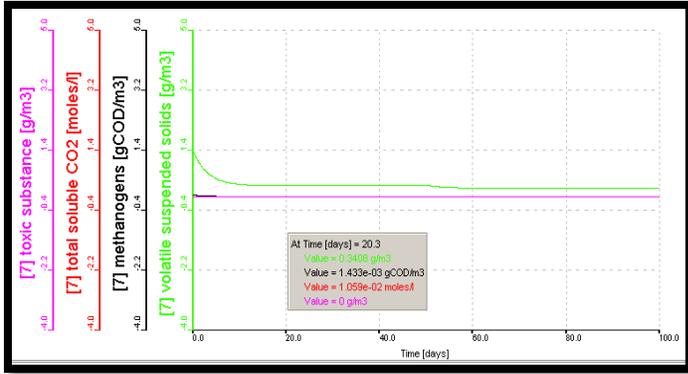


Figura 3.16 sustancias toxicas Vs metanogénesis

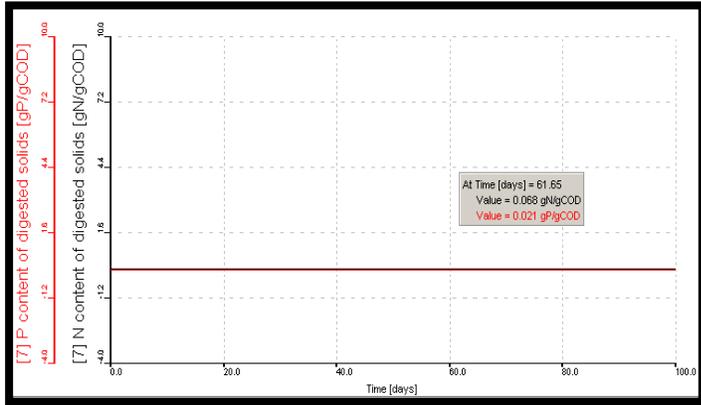


Figura 3.17 P vs N (solidos contenidos en el digestior)

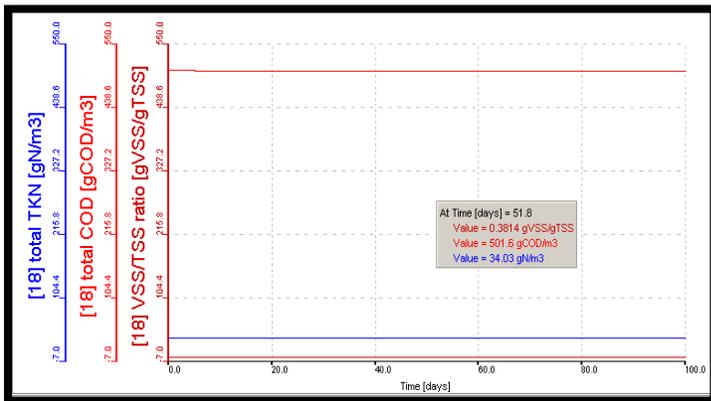


Figura 3.18 TKN vs DQO vs VSST/SST

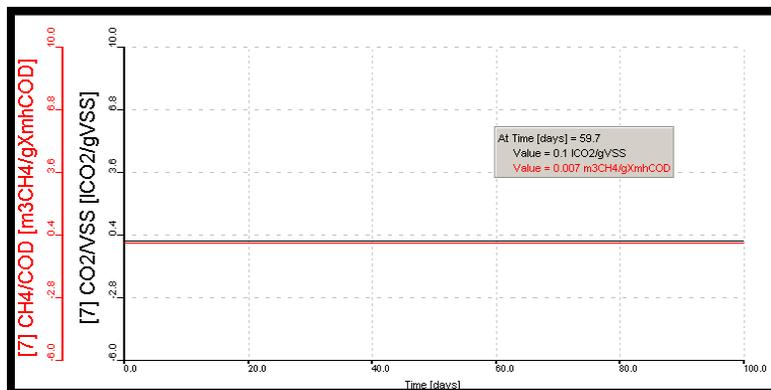


Figura 3.19- CH₄/DQO vs CO₂ vs DQO

Como se puede observar en la gráfica anterior tenemos una alta producción de gas en la etapa de metanogénesis los primeros 5 días y después se va inhibiendo el cual en un tiempo de 67.8 días obtenemos 501.7 gDQO/m³, este valores se relacionan con lo reportado en condiciones iniciales de la planta de digestión anaerobia, cuenta con una producción en la fase metanogénica de 5.851gDQO/m³ y no contamos con sustrato toxico, podemos observar que la metanogénesis podría encontrarse inhibida, este hecho puede tomarse particularmente por una alta concentración de ácidos grasos volátiles, relacionado con una baja alcalinidad lo que ocasiona prácticamente una producción nula de producción de biogás.

Cuando la materia prima fermenta en un digestor, tan solo parte de ella se convierte en metano, teniendo algo de material no digerido el cual se acumula en el fermentador y otra parte pasa al residuo.

Podemos concluir también el rango termofílico se aseguran tasas superiores de destrucción de patógenos.

A todo esto se observó y concluyó que analizando el tiempo de retención en el reactor, podremos indicar la tendencia general de los índices de eliminación de materia orgánica, la cual es expresada en forma de sólidos volátiles. Podemos notar también

que la eliminación de materia orgánica sigue una tendencia asintótica, con una eliminación completa a tiempo infinito.

De igual manera concluimos que valores bajos de carga orgánica implican bajas concentraciones en el influente y/o elevado tiempo de retención. El incremento de carga orgánica implica una reducción en la producción del gas.

De esta manera está muy claro la gran diferencia de los dos tipos de modelo respecto a UCTADM1 y el ADM1, el cual se resuelven mediante una ecuación matemática estructurada que expresa una igualdad entre dos expresiones algebraicas formadas por variables y constantes. Sirve para representar los eventos naturales, sin embargo, para los científicos, una ecuación es válida no solo por su funcionalidad, sino que además su forma debe ser perfecta y mostrar una poética universal.

Para justificar el modelo UCTADM1 descrito anteriormente se ocupó el software Matlab, en la librería Simulink en donde se recreó nuestro sistema representado en por la matriz de Sotemann (2005c) de la universidad Cape Town. Dicha matriz se representa en la tabla 3.3 citada a continuación:

Tabla 3.3 Matriz del modelo UCTADM1 sotemann (2005) y modificada, incluyendo el modelo de Musvoto (2000^a)

	Numero	C1	C2	C3	C7	C13	C28	C29	P1	P4	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
	Componentes	NH4	NH3	H2CO3	H	HAc	HPr	Pr	CO2	CH4	C _x H _y O ₂ N _A	C ₆ H ₁₂ O ₆	H2	Z _{AD}	Z _{AC}	Z _{AM}	Z _{HM}
No.	Procesos									gas	Sbp	Sbsf		Acido Gen	Aceto Gen	AMs	HMs
C46	F. Disociación HPr				1		-1	1									
C47	Reversible disociación Hpr				-1		1	-1									
P6	Disolucion CO ₂			1					-1								
P7	Expulsion de CO ₂			-1					1								
P8	Expulsion de NH ₃		-1														
D1	Hidrolisis		S1	S2							-1	S3					
D2	Acidogenesis pH ₂ bajo	-1		S4	1	S5						-1/YAD	S6	1			
D3	Acidogenesis pH ₂ alto	-1		S7	1	S8	S9					-1/YAD	S10	1			
D4	Decaimiento Acidogenesis endógeno		S11	S12							S13			-1			
D5	Acetogenesis	-1		S14	1	S15	-1/YAc						S16		1		
D6	Decaimiento acetogenico endógeno		S11	S12							S13				-1		
D7	Metanogénesis acetoclastica	-1		S17	1	-1/YAM				S18						1	
D8	Decaimiento endógeno acetoclastico metanogenico		S11	S12							S13					-1	
D9	Metanogenesis Hidrogenotrofico	-1		S19	1					S20			-1/YHM				1
D10	Decaimiento endógeno metanogénesis Hidrogenotrofico		S11	S12							S13						-1

Sotemann et al (2005c) dedujo la estequiometría de los procesos biológicos en el modelo directamente de las ecuaciones estequiométricas bioquímicas establecidas para cada uno de los procesos, dicha tabla la podremos observar a continuación ver la tabla 3.4.

La DQO biodegradable particulada entra de manera directa en nuestro sistema hidrolizando directamente en “glucosa” para esto poder lograr el orgánico intermedio que se forma en nuestro proceso como se puede observar en nuestro mapa conceptual citado anteriormente, y logrando la producción de Hidrógeno, ácido acético, propionato dependiendo de la carga de glucosa al inicial y siendo una alternativa en los proceso de Digestión Anaerobia.

Tabla 3.4 Estequiometria del Proceso de Digestión Anaerobia en el modelo UCTADM1

Acetogénesis (Proceso D5)						
C1	C3(S14)	C7	C13(S15)	C28	D3(S16)	D5
NH₄	H ₂ CO ₃	H	H _{AC}	HP _r	H ₂	Z _{AC}
Moles	Moles	Moles	Moles	Moles	Moles	Moles
-1	$\frac{1-2Y_{AC}}{Y_{AC}}$	1	$\frac{1-\frac{3}{2}Y_{AC}}{Y_{AC}}$	$-\frac{1}{Y_{AC}}$	$\frac{3-4Y_{AC}}{Y_{AC}}$	1

Tabla 3.5 Estequiometría del Proceso de Digestión Anaerobia en el modelo UCTADM1

Hidrolisis (Proceso D1)			
C2-NH ₃ (S1)	C3-H ₂ CO ₃ -(S2)	D1-S _{bp}	D2-S _{bs} (S3)
Moles	Moles	Moles	Moles
+A	$\frac{2Z + 3A - Y}{4}$	-1	$\frac{Y + 4X - 2Z - 3A}{24}$

Tabla 3.6 Estequiometría del Proceso de Digestión Anaerobia en el modelo UCTADM1)

Acidogénesis para Bajo pH ₂ (Proceso D2)						
C1-NH ₄	C3(S4) H ₂ CO ₃	C7 H	C13(S5) H _{AC}	D2-S _{bsf}	D3(S6) H ₂	D4 Z _{AD}
Moles	Moles	Moles	Moles	Moles	Moles	Moles
-1	$\frac{2\left(1 - \frac{5}{6}Y_{AD}\right)}{Y_{AD}}$	1	$\frac{2\left(1 - \frac{5}{6}Y_{AD}\right)}{Y_{AD}}$	$-\frac{1}{Y_{AD}}$	$\frac{4\left(1 - \frac{5}{6}Y_{AD}\right)}{Y_{AD}}$	1

Acidogénesis para Alto pH ₂ (Proceso D3)							
C1-NH ₄	C3(S7) H ₂ CO ₃	C7 H	C13(S8) H _{AC}	C28(S9) HP _r	D2 S _{bsf}	D3(S10) H ₂	D4 Z _{AD}
Moles	Moles	Moles	Moles	Moles	Moles	Moles	moles
-1	$\frac{\left(1 - \frac{5}{6}Y_{AD}\right)}{Y_{AD}}$	1	$\frac{\left(1 - \frac{5}{6}Y_{AD}\right)}{Y_{AD}}$	$\frac{\left(1 - \frac{5}{6}Y_{AD}\right)}{Y_{AD}}$	$-\frac{1}{Y_{AD}}$	$\frac{\left(1 - \frac{5}{6}Y_{AD}\right)}{Y_{AD}}$	1

Tabla 3.7 Estequiometría del Proceso de Digestión Anaerobia en el modelo UCTADM1

Metanogénesis Acetoclástica (Proceso D7)					
C1/NH ₄	C3-H ₂ CO ₃ (S17)	C7- H	C13 H _{AC}	P4-CH ₄ (S18)	D6 Z _{AM}
Moles	Moles	Moles	Moles	Moles	moles
-1	$\frac{\left(1 - \frac{5}{2}Y_{AM}\right)}{Y_{AM}}$	1	$-\frac{1}{Y_{AM}}$	$\frac{\left(1 - \frac{5}{2}Y_{AM}\right)}{Y_{AM}}$	1

Tabla 3.8 Estequiometría del Proceso de Digestión Anaerobia en el modelo UCTADM1

Metanogénesis Hidrogenotrófica (Proceso D9)					
C1 NH₄	C3-H ₂ CO ₃ (S19)	C7 H	P4 – CH ₄ (S20)	D3 H ₂	D7 Z _{HM}
Moles	Moles	Moles	Moles	Moles	moles
-1	$\frac{(1+10Y_{HM})}{4Y_{HM}}$	1	$\frac{(1+10Y_{HM})}{4Y_{HM}}$	$-\frac{1}{Y_{HM}}$	1

Tabla 3.9 Estequiometría del Proceso de Digestión Anaerobia en el modelo UCTADM1

Muerte / Respiración Endógena (Procesos D4,D6,D8,D10)			
C2 –NH₃ (S11)	C3 – H ₂ CO ₃ (S12)	D1 S _{bp} (S13)	D4, D6, D8,D10 Z _{AC} , Z _{AD} , Z _{AM} , Z _{HM}
Moles	Moles	Moles	moles
$\frac{Y + 4X - 2Z - 23A}{Y + 4X - 2Z - 3A}$	$\frac{5(Y - 2Z - 3A)}{Y + 4X - 2Z - 3A}$	$\frac{20}{Y + 4X - Z - 3A}$	-1

La tabla 3.10 a continuación, representa las constantes estequiométricas utilizadas para nuestro modelo a 37°C para los cuatro grupos de organismos de digestión anaerobia y la cual expreso Sotemann et al (2005c).

Tabla 3.10 Constantes estequiométricas y cinéticas a 37 grados centígrados.

Grupo de Organismo	Y	μ_{\max}	Ks	b z
Acidogénesis AD	0.1074	0.8	7.8×10^{-4}	0.041
Acetogénesis AC	0.0278	1.15	8.9×10^{-5}	0.015
Metanogénesis Acetoclástica AM	0.0157	4.39	1.3×10^{-5}	0.037
Metanogénesis Hidrogeno trófica HM	0.0040	1.2	1.56×10^{-4}	0.01
Inhibición de Hidrogeno para P_{H2}	$K_{H_2} = 6.25 \times 10^{-4} \text{ molH}_2/\text{L}$			
Hidrolisis Acido génica	$\mu_{\max, HYD} = 4.529$		$K_{SM, HYD} = 0.0486$	
	$K_{\max, HYD} = 6.797$		$K_{SS, HYD} = 0.0486$	

Para entender nuestra matriz anteriormente expresada en la tabla 3.3 se refirió a la letra (S) como la parte estequiométrica de nuestro modelo, y desarrollando esta parte encontramos los valores de la operación de nuestro proceso estequiométrico (ver tabla 3.11), y se le denotó a la letra (D) como la parte de nuestro Procesos dichos procesos expresadas mediante ecuaciones la cual podremos observar más adelante de esta tesis la cual describe las etapas de la digestión anaerobia modificada (UCTADM1)

Tabla 3.11 Valores estequiométricos obtenidos de nuestro modelo UCTADM1

Estequiometria	Valor	S11	0.7554624448
S2	-0.273125	S12	0.3066666667
S3	0.7409375	S13	0.9799118079
S4	16.95530726	S14	33.97122302
S5	16.95530726	S15	34.47122302
S6	33.91061453	S16	103.9136691
S7	8.477653631	S17	61.19426752
S8	8.477653631	S18	61.19426752
S9	8.477653631	S19	65
S10	8.477653631	S20	65

Otros valores que se encontró al desarrollar nuestra matriz origen fue tal como $X=4.1725$, $Y=7$, $Z=2.6275$, $A=0.2175$, siendo estos valores igualmente utilizados para el componente requerido $C_xH_yO_zN_A$. Sustituyendo estos valores en nuestra fórmula estequiométrica obtenemos para el caso de $4(x)=16.69$, $2(z)=5.255$, $3(A)=0.6525$.

Para los valores correspondientes a la muerte/ Respiración endógena para los cuatro grupos de organismos en la digestión anaerobia, encontramos $D_4=0.015$, $D_6=0.041$, $D_8=0.037$, $D_{10}=0.01$.

Desarrollando las ecuaciones diferenciales obtenidas de nuestra matriz del modelo UCTADM1 propuesto por Sotemann, 2006, obtenemos las siguientes ecuaciones las cuales se pueden observar a continuación:

Desarrollo de Ecuaciones diferenciales obtenidas en la Matriz (Sotemann, 2005)

$$C1 = \frac{dNH_4}{dt} = -1D_2 - 1D_5 - 1D_7 - 1D_9 \quad (39)$$

$$C1 = \frac{dNH_4}{dt} = -1D_3 - 1D_5 - 1D_7 - 1D_9 \quad (40)$$

$$C2 = \frac{dNH_3}{dt} = -1P_8 + S_1D_1 + S_{11}D_4 + S_{11}D_6 + S_{11}D_8 + S_{11}D_{10} \quad (41)$$

$$C3 = \frac{dH_2CO_3}{dt} = 1P_6 - 1P_7 + S_2D_1 + S_4D_2 + S_{12}D_4 + S_{14}D_5 + S_{12}D_6 + S_{17}D_7 + S_{12}D_8 + S_{19}D_9 + S_{12}D_{10}$$

$$C3 = \frac{dH_2CO_3}{dt} = P_6 - P_7 + S_2D_1 + S_7D_3 + S_{12}D_4 + S_{14}D_5 + S_{12}D_6 + S_{17}D_7 + S_{12}D_8 + S_{19}D_9 + S_{12}D_{10}$$

$$C7 = \frac{dH}{dt} = 1C_{46} - 1C_{47} + 1D_2 + 1D_5 + 1D_7 + 1D_9 \quad (44)$$

$$C7 = \frac{dH}{dt} = 1C_{46} - 1C_{47} + 1D_3 + 1D_5 + 1D_7 + 1D_9 \quad (45)$$

$$C13 = \frac{dH_{AC}}{dt} = S_5D_2 + S_{15}D_5 - \frac{1}{Y_{AM}} D_7 \quad (46)$$

$$C13 = \frac{dH_{AC}}{dt} = S_8D_3 + S_{15}D_5 - \frac{1}{Y_{AM}} D_7 \quad (47)$$

$$C28 = \frac{dHP_r}{dt} = -1C_{46} + 1C_{47} + S_9D_3 - \frac{1}{Y_{AC}} D_5 \quad (48)$$

$$C_{29} = \frac{dP_r}{dt} = C_{46} - C_{47} \quad (49)$$

$$P_1 = \frac{dCO_2}{dt} = -P_6 + P_7 \quad (50)$$

$$P_4 = \frac{dCH_4}{dt} = S_{18}D_7 + S_{20}D_9 \quad (51)$$

$$D_1 = \frac{dC_X H_Y O_Z N_A}{dt} = -1D_1 + S_{13}D_4 + S_{13}D_6 + S_{13}D_8 + S_{13}D_{10} \quad (52)$$

$$D_2 = \frac{dC_6 H_{12} O_6}{dt} = S_3 D_1 - \frac{1}{Y_{AD}} D_2 \quad (53)$$

$$D_2 = \frac{dC_6 H_{12} O_6}{dt} = S_3 D_1 - \frac{1}{Y_{AD}} D_3 \quad (54)$$

$$D_3 = \frac{dH_2}{dt} = S_6 D_2 + S_{16} D_5 - \frac{1}{Y_{HM}} D_9 \quad (55)$$

$$D_3 = \frac{dH_2}{dt} = S_{10} D_3 + S_{16} D_5 - \frac{1}{Y_{HM}} D_9 \quad (56)$$

$$D_4 = \frac{dZ_{AD}}{dt} = 1D_2 - 1D_4 \quad (57)$$

$$D_4 = \frac{dZ_{AD}}{dt} = 1D_3 - 1D_4 \quad (58)$$

$$D_5 = \frac{dZ_{AC}}{dt} = 1D_5 - 1D_6 \quad (59)$$

$$D_6 = \frac{dZ_{AM}}{dt} = 1D_7 - 1D_8 \quad (61)$$

$$D_7 = \frac{dZ_{HM}}{dt} = 1D_9 - 1D_{10} \quad (62)$$

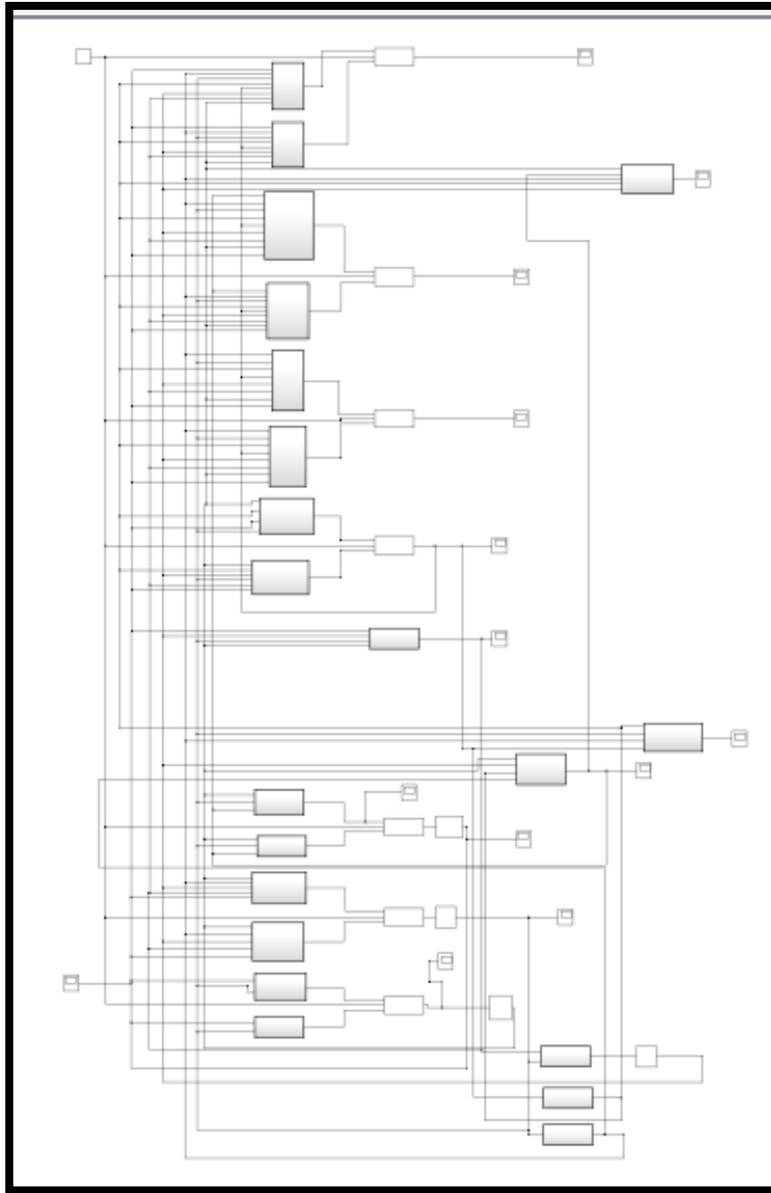


Figura 3.21 Modelo UCTADM1 desarrollado en Simulink

Una vez desarrollado el modelo UCTADM1 se procedió a realizar una comparación del modelo con lo reportado por Sotemann Vs lo que se obtuvo con el modelo, desarrollándolo en Simulink, el cual se puede observar de manera clara en la figura 3.22

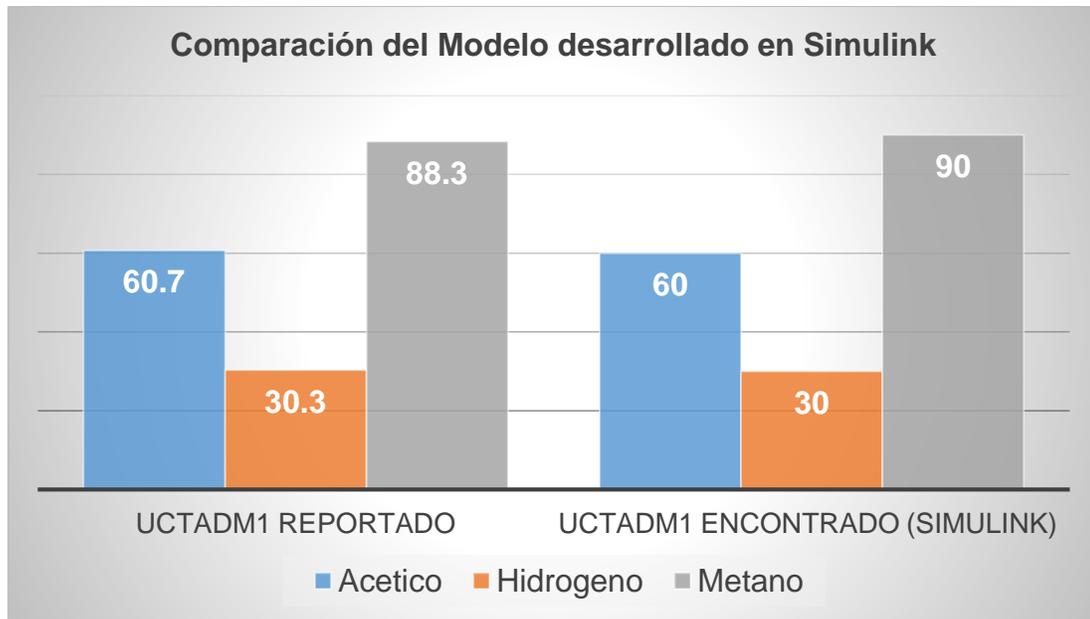


Figura 3.22 Comparación del Modelo UCTADM1 reportado Vs obtenido

3.4 Cuarta fase: Simulación de la planta de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos

En esta cuarta etapa de la investigación se seleccionó un tren de tratamiento idóneo para los residuos sólidos orgánicos Municipales (RSOM), así como para la producción de metano en un reactor anaerobio utilizando el modelo ADM1 por sus siglas en inglés Anaerobic Digestion No1 Creado por la IWA international Water Association.

Conocer las variables de entrada para la cuantificación y caracterización en nuestro sistema es de vital importancia hablando de cualquier proceso, en la digestión anaerobia no es la excepción, y gracias a esto podremos aplicar un tratamiento correcto, para poder evaluar las condiciones requeridas.

El muestreo de (RSOM) Residuos Sólidos Orgánicos Municipales, para la composición, cuantificación y caracterización se llevó a cabo en un estudio previo de los Residuos Orgánicos Municipales Provenientes del Municipio de Río Blanco, Veracruz.

Estos en su mayoría representados por la lechuga, seguido de la naranja, jitomate, piña, papaya, col, Hoja de Coliflor, Melón, Sandía, Pepino. Siendo estos diez residuos los más significativos durante dicho análisis y comparándolos con los resultados de (Alvarado, 2011) corresponden de igual manera a los residuos provenientes del mercado zapata de la ciudad de Orizaba, Veracruz. Dichos resultados los podemos observar en la figura 3.23 correspondiente a la composición de la materia organica más desechados en los mercados municipales de la region, con esto se tiene una gran idea del impacto que tienen estos residuos. El aprovechamiento y rehúso que se le puede dar al aplica un tratamiento idóneo para lograr su máximo rendimiento.

El aprovechamiento de estos residuos tiene en nuestra actualidad un gran auge esto gracias a su alto contenido en carbohidratos que estos residuos tienen, dichos componentes se reflejan más a delante en esta parte de la tesis.

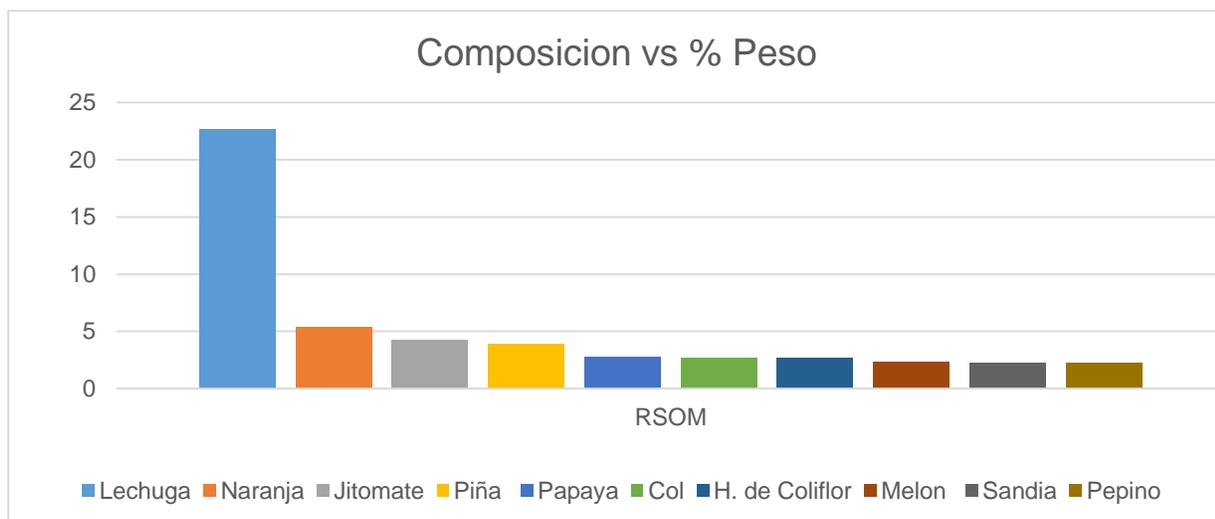


Figura 3.23 Composición de la materia orgánica

3.4.1 Caracterización física de los residuos sólidos orgánicos municipales

La caracterización física de los residuos sólidos orgánicos municipales obtuvieron una composición promedio de 22.39% de fase sólida y 77.61% de fase de bajo contenido de sólidos, cómo podemos observar en esta relación encontramos que los residuos sólidos orgánicos municipales cuentan con una composición alta en agua, por lo cual contienen humedad. En la tabla 3.12 se muestra los resultados obtenidos de la caracterización física de los RSOM por unidad.

Tabla: 3.12 Caracterización de RSOM en base a 1kg

Físicos	Unidad	Método	Valor Max.	Valor min	Promedio
Fase sólida	%	Porcentual	41.60	10.37	22.39
Fase líquida	%	Porcentual	89.63	58.63	77.61
Volúmen	L	Volumétrico	08400	0.5000	0.6641
Masa de solido	Kg	Gravimétrico	0.4160	0.1037	0.2240

3.4.2 Características físicoquímicas de los residuos sólidos orgánicos

Se caracterizó el RSO a utilizar, y saber de manera más individual sus características. (Ver tabla 3.13).

Tabla: 3.13 Características de los RSOM de manera Individual

Residuo	Calorías	Carbohidratos	Proteínas	Grasas y AG
Lechuga	0.7 (2.9KJ)	0.1 g (70%)	0.1 g (22%)	0.0 g (8%)
Naranja	64.6 (270kJ)	0.0 g (0%)	13.9 g (92%)	0.6 g (8%)
Jitomate	25.3 (106 KJ)	5 g (72%)	1.8 g (18%)	0.3g (10%)
Piña	451 (1888KJ)	118 g (94%)	5.5 g (4%)	1.3g (2%)
Papaya	54.6 (229 KJ)	13.7 g (92%)	0.9 g (5%)	0.2 g (3%)
Col	22.2 (92.9 KJ)	5.2 g (85%)	1.1 g (12%)	0.1 g (3%)
H. de Coliflor	25 (105KJ)	5.3 g (78%)	2 g (19%)	0.1 g (3%)
Melón	63.7 (267KJ)	16.1 g (92%)	1.0 g (5%)	0.2 g (3%)
Sandia	46.2 (193KJ)	11.6 g (89%)	0.9 g (7%)	0.2 g (4%)
Pepino	7.8 (32.7KJ)	1.9 g (83%)	0.3 g (11%)	0.1 g (6%)
Manzana	52.8 (221KJ)	14.0 (96%)	0.3 g (2%)	0.1 g (2%)
Cilantro	14.9 (62.4KJ)	2.7 g (36%)	0.6 g (14%)	0.9 g (50%)
Chayote	18.1 (75.8KJ)	3.8 g (73%)	1.4 g (18%)	0.2 g (9%)
Limón	21.6 (90.4KJ)	11.6 g (63%)	1.3 g (24%)	0.3 g (13%)
Zanahoria	5.3 (22.2KJ)	1.2 g (92%)	0.1 g (5%)	0.0 g (3%)
Cebolla	64.0 (268KJ)	14.9 g (90%)	1.8 g (8%)	0.2 g (2%)
Rábano	18.6 (77.9KJ)	4.0 g (83%)	0.8 g (12%)	0.1 g (5%)
Mango	107 (448KJ)	28.1 g (94%)	0.8 g (3%)	0.4 g (3%)
Mandarina	103 (431KJ)	26.0 g (90%)	1.6 g (5%)	0.6 g (5%)
Acelga	6.8 (28.5KJ)	1.3 g (68%)	0.6 g (23%)	0.1 g (9%)
Cebollín	0.9 (3.8KJ)	0.1 g (53%)	0.1 g (27%)	0.0 (20%)
Calabacitas	3.4 (14.2KJ)	0.5 g (53%)	0.4 g (31%)	0.1 g (16%)

Como se pudo observar, una buena opción para tratar el residuo sólido orgánico municipal a través de la fase de bajo contenido de sólidos de los RSOM, por ello es de vital importancia conocer las características físicoquímicas de las mismas.

La caracterización físicoquímicas de la fracción de bajo contenido de sólidos de RSOM obtuvo un pH promedio de 4.55, para esto los valores obtenidos de pH oscilan en el rango de ácido a ligeramente ácidos (pH entre 3.34 y 5,56).

Otros valores a considerar fueron los SST, SSV, así como SSF. El cual correspondió valores en un rango de 9.46 – 62.90 g/L para SST, 5.96-56.20 g/L para SSV y un rango de 1.46-29.36 g/L correspondiente a SSF, mientras que la DQO estuvo en un intervalo de 22.12-102.22 g DQO_T/L Y 13.79-92.77 g DQO_S/L. (Alvarado, 2011).

Lo anteriormente mencionado se observó de manera más clara en la (tabla 3.14) en la cual podremos observar de manera mas clara la caracterización fisicoquímica de la fracción soluble de residuos solidos organicos municipales.

Tabla 3.14. Caracterización físicoquímicas de la FRSOM

Físicas	Unidad	Método	Valor Max	Valor Min	Promedio
pH	-	Potenciométrico	5.56	3.34	4.55
SST	g/L	Gravimétrico	62.90	9.64	38.40
SSV	g/L		56.20	5.96	31.45
SSF	g/L		29.36	1.46	6.95
Químicos	Unidad	Método	Valor Max	Valor Min	Promedio
DQO total	g/L	Micrómetro	102.22	22.12	56.84
DQO soluble	g/L	colorímetro	92.77	13.79	49.72
Carbohidratos	g/L	Antrona- sulfúrico	68.00	9.00	36.42
Lípidos	g/L	Extracción soxhlet	7.95	0.16	2.21
proteínas	g/L	Kjeldahl	11.87	1.84	4.95

Como se pudo observar en las dos tablas anteriormente citadas y bajo esta caracterización físicoquímica de FRSOM, se comprobó que los compuestos macromoleculares que más abundan en los RSOM son los carbohidratos, el cual nos sirve como fuente de carbono para las diferentes poblaciones bacterianas que intervienen en el proceso de digestión anaerobia.

Los RSOM que se generaron el cual tiene un contenido de fracción líquida alrededor del 77.61%, así como un pH ácido. Estas dos características dan como resultado que la digestión anaerobia es el proceso biológico más idóneo para el tratamiento de los RSOM. El contenido de fase líquida o humedad de los RSOM fue uno de los principales factores que se llegaron a la conclusión del uso de digestión anaerobia.

3.4.3 Selección de equipos para la planta de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos municipales

Se estableció un tren de tratamiento idóneo de la planta de aprovechamiento de RSO, con la finalidad de aprovechar y evaluar las condiciones óptimas, logrando el mejor rendimiento para nuestro proceso. Este sistema consta de dos fases (ver figura 3.24), la primera corresponde al tratamiento correspondiente a un reactor de hidrólisis, conectado posteriormente a un reactor anaerobio para evaluar la producción de metano bajo el modelo tradicional ADM1.

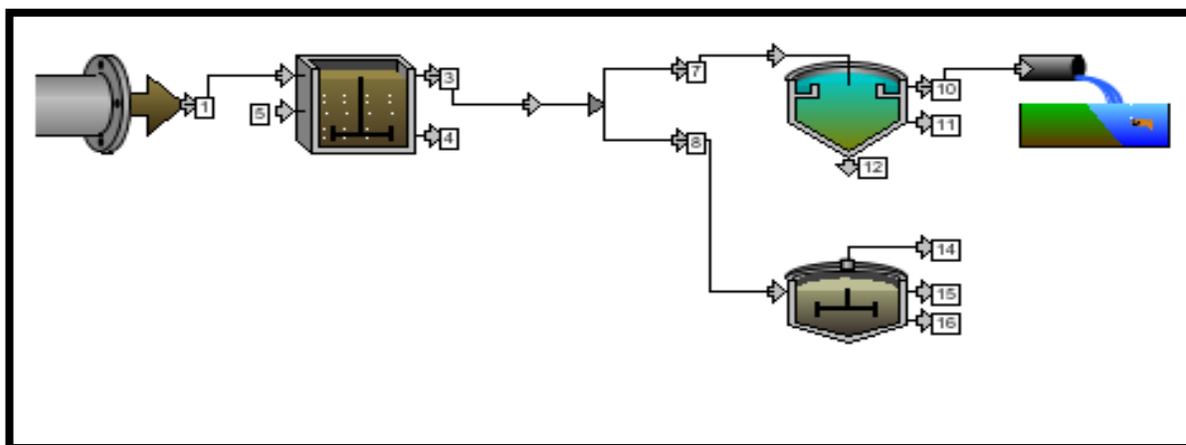


Figura: 3.24 Diagrama de flujo de la planta de aprovechamiento de RSO.

Para obtener una óptima cantidad de biogás es necesario un adecuado pre-tratamiento del sustrato (fracción de bajo contenido de sólidos), el cual se llevará a cabo en un reactor de Hidrolisis. Debido a que esta etapa es una de las principales limitantes en el proceso de la digestión anaerobia, es necesario que la materia orgánica se encuentre con un bajo contenido de sólidos, gracias a esto podremos

obtener un excelente funcionamiento y obtener altos rendimientos en etapas posteriores.

El reactor de hidrolisis consta de un volumen total de 1200 L y un volumen útil de 1100 L, este reactor cuenta con una chaqueta exterior de calentamiento cuya capacidad es de 280 litros. (Ver tabla 3.15) correspondiente a las medidas del reactor de Hidrólisis.

Tabla 3.15 Medidas del reactor de Hidrolisis

Volumen útil	Altura total	Altura del reactor	Diámetro interno	Diámetro con chaqueta
1100 L	1.45 m	0.95 m	1.1 m	1.26 m

El reactor de Digestión Anaerobia es un tanque cerrado, con forma cono-cilíndrica. En la parte superior del reactor, cuenta con un separador de tres fases (sólido-gas-liquido). Este dispositivo permite retener el biogás producido para su conducción por canales hacia el exterior para su posterior consumo. La parte inferior del reactor tiene una forma cónica en el cual se deposita el lodo granular.

La entrada del líquido crudo a tratar es por la parte inferior del reactor y la salida del efluente es por la parte superior del reactor. Las características específicas del reactor anaerobio se encuentran descritas en la tabla 3.16 así como los porcentajes del volumen total y de trabajo descritos en la tabla 3.17

Tabla 3.16 Características del reactor anaerobio

Características EGSB	Medidas
Diámetro interno	1.31 m
Altura total	2.82 m
Altura útil	2.5 m
Volúmen del lodos	0.45 m ³
Volúmen útil del reactor	2.47 m ³
Volúmen útil del cono del reactor	0.147 m ³
Volúmen de la cámara de biogás	1.06 m ³
Volúmen total del reactor	3.53 m ³

Tabla 3.17. Porcentaje del volumen total y de trabajo del reactor anaerobio

Porcentaje del volumen total del reactor	
Volúmen	%
Trabajo	70%
Cámara de biogás	30%
Total del reactor	100%
Porcentaje de trabajo del reactor	
Volúmen	%
Inoculo	30%
Útil	70%
Trabajo	100%

3.4.4 Caracterización físicoquímicas de la fracción soluble de RSOM a hidrolizar.

La caracterización de los residuos físicoquímico de la fracción de RSOM para el tratamiento en la hidrolisis, se efectuó en un medio ácido y térmico. Los resultados obtenidos en dicha caracterización de la fracción de bajo contenido en solidos fue, una concentración promedio de SST de 40.70 g/L. la determinación de SSV y SSF dieron un promedio de 33.93 g/L referente a solidos suspendidos volátiles y un promedio de 6.77 g/L respecto a los solidos suspendidos fijos. Lo que concierne a la caracterización química de la fracción baja en solidos se obtuvieron resultados de 54.47 g DQO_T/L y 44.40 g DQO_s/L en promedio. Mientras que en la composición de las macromoléculas que forman la materia orgánica se obtuvieron promedios de 38.33 g /L en carbohidratos, 2.02 g/L en lípidos y 5.57 g/L en proteínas.

Por último, la caracterización físicoquímica de los RSOM, se obtuvieron composiciones en la muestra, con fracciones en bajo contenido de sólidos, una concentración promedio de ácido acético y ácido propionico de 9.13 mg/L y 2.35 mg/L respectivamente. En cuanto a la determinación del carbono orgánico presente en la muestra este tuvo un valor promedio de 5.18 g/L. (ver tabla 3.18) la cual nos muestra la caracterización físicoquímica de fracción de bajo contenido de solidos que concierne a los residuos sólidos orgánicos municipales sin tratamiento.

Tabla 3.18 Caracterización físicoquímica de la fracción con bajo contenido en sólidos de RSOM Inicial (Sin tratamiento).

Físicos	Unidad	Método	promedio
SST	g/L	Gravimétrico	40.70
SSV	g/L		31.45
SSF	g/L		6.77
Químicos	Unidad	Método	Promedio
DQO total	g/L	Micro método colorimétrico	58.85
DQO soluble	g/L		44.40
Carbohidratos	g/L	Antrona - sulfúrico	38.33
Lípidos	g/L	Extracción soxhlet	2.02
Proteínas	g/L	Kjeldahl	1.95
Especiales	Unidad	Método	Promedio
AGV's Ac. Acetico	Ppm	HPLC	9.13
Ac. Propionico	(mg/L)		2.35
COT	g/L	Combustión catalítica. infrarrojo	5.18

Una vez evaluado las concentraciones iniciales en el reactor de hidrólisis al inicio de nuestro proceso de digestión anaerobia, las cuales son de vital importancia al momento de realizar la simulación, ya que entre más exactas sean nuestras mediciones y valores a nuestro proceso real, los resultados obtenidos en nuestra simulación serán congruentes respecto a nuestro sistema, por lo tanto, evaluación y conclusiones respecto a nuestro proceso serán satisfactorias.

Con estos parámetros evaluamos la eficiencia de remoción del sistema compuesto por el reactor de hidrolisis y el de digestión anaerobia, la simulación tendrá variable

de control principalmente (flujo y concentración) carga orgánica. Al variar la carga orgánica podremos observar el comportamiento de DBO, SST, en el efluente, como la generación de metano.

Predecir o intentar predecir nuestro sistema con el fin de mejorarlo, esta pregunta fue realizada con la finalidad de poder evaluar la eficiencia de nuestro sistema, variar la carga orgánica máxima para el volumen fijo del reactor como la velocidad ascensional, sin embargo, al aumentar la carga debemos analizar y tener en cuenta el volumen del tanque, la velocidad de ascenso, y condiciones a diferentes temperaturas.

Sin embargo se optó por emplear el modelo UCTADM1 como un nuevo caso de estudio debido a que es un modelo más simplificado que describe el proceso de digestión anaerobia.

Se comparó el modelo ADM1 con el UCTADM1 donde se pudo constatar que el modelo UCTADM1 genera un mayor rendimiento de hidrógeno, así como una casi igualdad en la generación de metano y un menor rendimiento de ácido acético. Las cantidades obtenidas se pueden observar en la (figura 3.25) correspondiente a la comparación de la producción de bioenergía en ambos modelos.

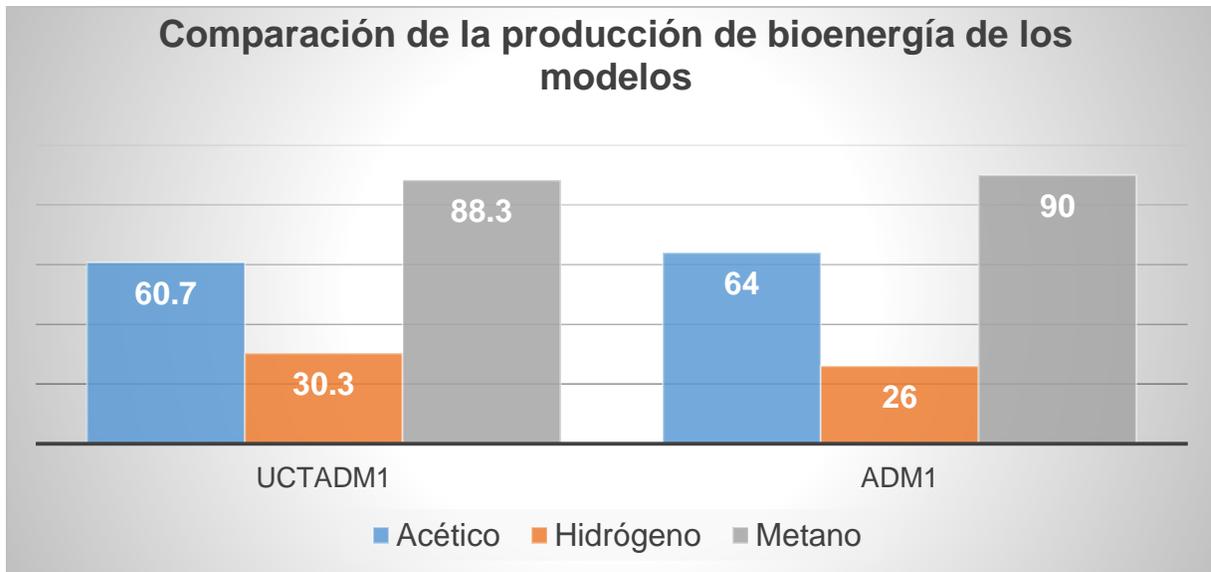


Figura 3.25 Comparación de la producción de bioenergía de los modelos

3.4.5 Resultados obtenidos de la simulación en Simulink con el modelo UCTADM1

Se partió realizando una caracterización de los RSOM procedentes del mercado de río blanco, dicha caracterización la podemos observar en el anexo D de esta tesis., Posteriormente se hizo una comparación de RSOM, estos reportados por (Alvarado, 2011 y Magdaleno, 2013) y considerando los 10 Residuos mas significativos que se encontraron en las tres caracterizaciones, posteriormente , se procedió a buscar los porcentajes de carbohidratos, proteínas y grasas de los 10 residuos obtenidos, dichos resultados lo podremos ver en la tabla 3.13 de esta tesis, y se realizó la caracterización físicoquímica de la FRSOM la cual al acemejar la caracterización de los RSOM se

considero la caracterización realizada por (Alvarado 2011). Dicha caracterización la encontramos en la tabla 3.18 de esta tesis.

De acuerdo a literatura existente, se realizó el mismo procedimiento para el desarrollar el modelo en residuos orgánicos. Durante el desarrollo del modelo para la digestión anaerobia, se inició partiendo de la formula estequiométrica aceptada en el modelo UCTADM1 el cual fue avalado en estudios previos $C_5H_7O_2N$ (WRC, 1984).

Para realizar el cálculo de los valores de CHON se siguió el procedimiento realizado por Izzet et al (1992), el cual lo podemos seguir en el apéndice A de la tesis de (Sotemann 2005). Dicho procedimiento se realiza a continuación: Se inicio tomando valores de laboratorio estudiados por (Alvarado, 2011) correspondiente a la materia orgánica tratada en reactores de digestión anaerobia y observamos a continuación en la tabla 3.19

3.19 Tabla Resultados de análisis de residuos orgánicos de laboratorio

P H	4-5	-----
SST	38.49 g/L	38400.00 mg/l
SSV	31.45 g/l	31450 mg/l
DQO_{total}	58.85 g/l	58850.00 mg/l
TKN	1.95 g/l	1950.00 mg/l
DQO_s	49.72 g/l	49720.00 mg/l
Lípidos	2.21	2210.000 g/l
Carbohidratos	36.42 g/l	364200 g/l
% de humedad	77.61 %	-----

Con estos análisis de laboratorio se continuó con el procedimiento establecido para encontrar los valores de CHON, dichos valores los encontramos en la tabla A3 de Soteman en el apéndice A, donde calculan los valores de DQO/SSV, así como TKN/SSV. Realizando dicho cálculo con los valores que obtenidos anteriormente en el análisis de laboratorio se obtuvo:

$$\frac{DQO_t}{SSV} = \frac{58.85}{31.45} = 1.8712 \quad (63)$$

$$\frac{TKN}{SSV} = \frac{1.95}{31.45} = 0.0620 \quad (64)$$

Posteriormente, se buscaron dichos valores en la tabla A3, para conocer si alguno de ellos se asemeja a mis resultados, dicha tabla cuenta con valores para la formulación de CHON realizados por Ristow et al 2004 y citados por Soteman y se presenta a continuación en la (tabla 3.20) a continuación mencionada.

Tabla 3.20 Valores para la formulación de CHON realizados por Ristow

DQO /VSS	TKN /VSS	Formulación Medida	Formulación de Literatura
2.074	0.038	$C_{4.15}H_7O_{2.42}N_{0.22}$	$C_{3.5}H_7O_2N_{0.196}$
1.83	0.041	$C_{4.31}H_7O_{3.03}N_{0.24}$	$C_{3.5}H_7O_2N_{0.196}$
1.907	0.036	$C_{4.06}H_7O_{2.43}N_{0.19}$	$C_{3.5}H_7O_2N_{0.196}$
1.799	0.068	$C_{4.36}H_7O_{3.14}N_{0.26}$	$C_5H_7O_2N$
1.025	0.052	$C_{4.53}H_7O_{5.85}N_{0.22}$	$C_5H_7O_2N$
1.880	0.068	$C_{4.35}H_7O_{3.02}N_{0.24}$	$C_5H_7O_2N$

1.767	0.089	$C_{4.47}H_7O_{3.41}N_{0.23}$	$C_5H_7O_2N$
1.434	0.070	$C_{5.11}H_7O_{4.58}N_{0.25}$	$C_5H_7O_2N$
1.716	0.083	$C_{4.63}H_7O_{3.43}N_{0.24}$	$C_5H_7O_2N$
1.498	0.034	$C_{4.44}H_7O_{3.86}N_{0.21}$	$C_5H_7O_2N$
1.501	0.079	$C_{4.62}H_7O_{4.40}N_{0.24}$	$C_5H_7O_2N$

Se observaron valores cercano a mis resultados y obtenidos en el estado nueve que tienen una DQO/SSV de 1.880 como una TKN/SSV de 0.068 y una formulación de $C_{4.35}H_7O_{3.02}N_{0.24}$

La siguiente composición corresponde a los residuos de (Alvarado, 2011)



Se realizo el mismo procedimiento para los residuos de (Magdaleno, 2013) con una composición de $C_{4.36}H_7O_{3.14}N_{0.26}$

La siguiente composición correspondiente a (Magdaleno, 2013)



Como podemos observar la diferencia de los valores no es muy significativo y se tomo el valor intermedio entre estas dos composiciones, obteniendo:



Posterior a esto, se realizó la simulación de la materia orgánica de residuos sólidos del Instituto Tecnológico de Orizaba en el software Matlab con la librería Simulink

Tomando como base la composición obtenida de $C_{4.35}H_7O_{3.06}N_{0.25}$ el cual es el 100 %
 A continuación se presentó la estequiometría de la digestión anaerobia, con los residuos sólidos orgánicos en 100 gDQO (degradación de la materia orgánica) figura: 3.23

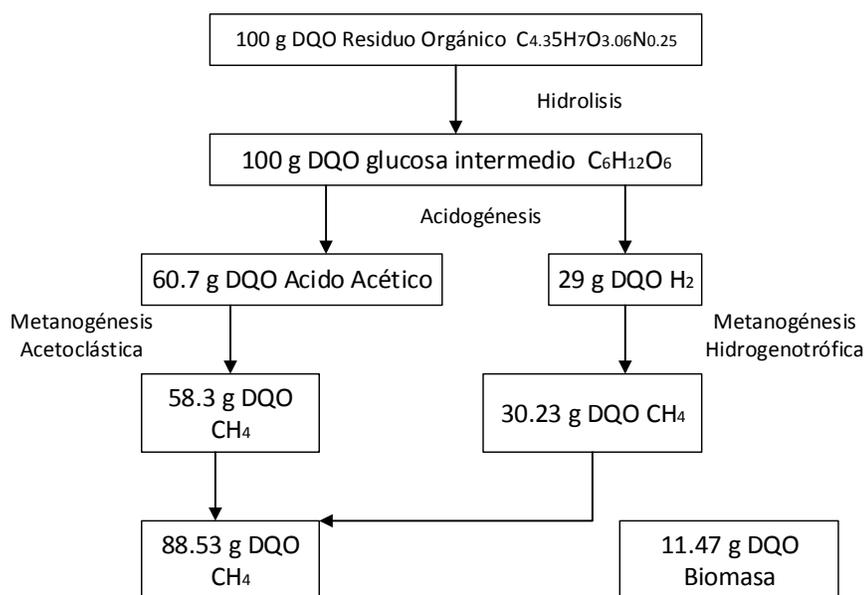


Figura: 3.23 Estequiometría de la degradación de la materia orgánica con el modelo UCTADM1

Al realizar esta simulación se obtiene una producción de metano de 88.53 g de DQO el diagrama obtenido se presenta en la figura 3.24

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La selección del modelo que representa la Digestión Anaerobia está altamente relacionado con el sistema a emplear y en ocasiones es necesario adecuar el mismo para poder representar de manera adecuada el proceso global.

El modelo UCTADM1 representa una opción adecuada para el proceso de Codigestión al conocerse una fórmula empírica de la mezcla que entra al reactor anaerobio.

El modelo UCTADM1 tiene una mayor producción de hidrógeno respecto al modelo ADM1, esto es fundamental, ya que el hidrógeno, es un gran caso de estudio a nivel mundial y puede ser utilizado como energía limpia.

El modelo UCTADM1 representa un manejo fácil para la Codigestión partiendo de la fórmula empírica $C_xH_yO_zNa$, además de ser un proceso más corto.

Al emplear el modelo UCTADM1 con la finalidad de optimizar el proceso de digestión anaerobia, se generó un incremento de la eficiencia del modelo mencionado en aproximadamente 15-20 %

Recomendaciones

Se recomienda seguir con el estudio del modelo, dirigido a la producción de hidrógeno con el fin de optimizarla, puesto que la tendencia va dirigida hacia la producción de hidrógeno en la actualidad, esto con el propósito de obtener alternativas en la producción de energías limpias y que sean de gran impacto a nuestro medio ambiente para lograr así una estabilidad en nuestro medio, reduciendo los grandes índices de contaminación que se presentan, no solo a nivel nacional, si no también a nivel mundial, el cual es un problema que se busca erradicar, ya que es ocasionado por el incremento tanto del índice poblacional, así como el incremento en industrias de cualquier manufactura.

Bibliografía Alfabética

- Abranska, J., Dohansyos, M., Jenicek, P., Kutil, J., & Cejka, J. (2006). Mechanical and rapidthermal disintegration methods of enhancement of biogas production Full scale applications. *IWA specialized congerence: Sustainable Sludge management: State or the art, challenges and perspectives*. Moscow, Russia: International Water Association.
- Ahring, B., & Angelidaki, I. (1997). Co-digestion of olive mil wastewater with manure household waste or swage sludge. *Biodegradation*, 221-226.
- Ahring, B., Angelidaki, I., & Johansen, K. (1992). Anaerobic Treatment of Manure Together with Industrial Waste. *Waster Science Technology*, 311-318.
- Ahring, B., Mladenovska, Z., Iranpour, R., & Westermann, P. (2002). State of art and future Perspectives of Thermophilic Anaerobic Digestion. *Water Science of Technology*, 45(10):293-298.
- Ahring, B., Sandberg, M., & Angelidaki, I. (1995). Volatile fatty acids as indicators of Process imbalance in Anaerobic Digesters. *Applied Microbiological Biotechnology*, 43(3):559-565.
- Alartriste-Mondragon, F., Samar, P., Cox Hub, H., Birgitte, K., & Iranpour Reza, A. (2006). Anaerobic Codigestion of Municipal, Farm and Industrial Organic Wastes. *Water Environment Research*, 607-636.
- Álvarez-Mata, A. (2004). produccion anaerobica de biogás, aprovechamiento de los residuos del proceso anaerobio. *Mayor san andres*, 221-236.

-
- Angelidaki, I., & Ahring, B. (1994). Anaerobic thermophilic digestion of manure at different ammonia loads. *Water Research*, 727-731.
- Armat D, M., Jaen, J., & Henriquez, F. (2011). Resultados preliminares en el analisis de la simulacion de procesos de tratamiento de aguas residuales durante fases de diseño y operacion utilizando GPS.X. *El sevier*, 233-236.
- Bailey, W., & Weir, I. (1998). Investigation of methods for direct rheological model parameter estimation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1-2.
- Baserba, M., Angelidaki, I., & Karakashev, D. (2012). Effect of continuous oleate addition on microbial communities involved in Anaerobic Digestion Process. *Bioresources Technology*, 74-81.
- Batstone, D. (2006). Mathematical modelling of anaerobic reactors treating domestic wastewater: Rational criteria for model use. *Environmental Science and Biotechnology*, 57-71.
- Batstone, D., & Keller, J. (2003). Industrial Application of the IWA Anaerobic Digestion Model No.1. *Water Science Technology*, 199-206.
- Batstone, D., & Keller, J. (2003). Industrial applications of the IWA anaerobic digestion model No1 (ADM1). *Water Science and Technology*, 199-206.
- Batstone, D., Keller, J., & Blackall, L. (2004). The influence of substrate kinetics on the microbial community structure in granular anaerobic biomass. *Water Reserch*, 1390-1404.
- Batstone, D., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S., Pavlosthathis, S., Rozzi, A., . . . Valvilin, V. (2002). *Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1)*. London , UK: IWA Publishing.

-
- Batstone, D., Picioreanu, C., & Van Loosdrecht, M. (2006). Multidimensional modelling to investigate interspecies hydrogen transfer in anaerobic biofilms. *Water Reserch*, 3099-3108.
- Batstone, D., Pind, P., & Angelidaki, I. (2003). Kinetic of thermophilic anaerobic oxidation of straight and branched chain butyrate and valerate. *Biotechnology and Bioengineering*, 194-204.
- Blumensaat, F., & Keller, J. (2005). Modelling of two-stage Anaerobic Digestion Using the IWA Anaerobic Digestion Model No.1. *Water Reserch*, 171-183.
- Brambilla, M., Araldi, F., Marchesi, M., Bertazzoni, B., Zaghim, M., & Navarotto, P. (2012). Monitoring of the startup phase of one continuous Anaerobic Digester at pilot Scale level. *Biomass and Bioenergy*, 439-446.
- Buhr, O., & Andrews, J. (1977). The Thermophilic Anerobic Digestion Process. *Water Reserch*, 129-143.
- Campos, E., & Flotats, X. (2003). Dynamic Simulation of pH in Anaerobic Processes. *Biochemistry and Biotechnolgy*, 63-76.
- Comision Nacional del Agua (CONAGUA);. (2011). *Inventario Nacional de plantas de tratamiento de aguas*. www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/Inventario%20de%20plantas%20municipales%202009.
- De Baere, L. (2000). Anaerobic Digestion of Solid wastes. *Water Science and Technology*, 283-290.

-
- Derbal, K., Bencheikh, M., & Mentai, A. (2010). Use of ADM1 model to simulate the anaerobic digestion process used for sludge waste treatment in thermophilic conditions. *Enviromental Science*, 121-129.
- Eddy, M. &. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and reuse*. New York, USA: McGraw Hill.
- Erickson, L. E., Mandeley, P. K., & Remy, M. J. (2005). Two - Stage anaerobic digestion of energy crops: methane production, nitrogen mineralisation and heavy metal mobilisation . *Enviromental Technology*, 2009-218.
- Escudié, R., Conte, T., & Steyer, J. (2005). Hidrodinamyc and biokinetic model of anaerobic fixed bed reactor. *Process Biochemistry*, 2311-2322.
- Feng, Y., Behrendt, J., & Wendland, C. (2006). Parameters Analysis and Discussion of the Anaerobic Digestion Model No.1. *Water Science & Technology*, 139-147.
- Girovich, M. (1996). *Biosolids Treatment and Management*. New York, EUA.: Marcel Decker.
- Global, E. (2011). *Manual del biogás*. santiado de chile, Chile: Global Enviroment Facility.
- Graja, S., Chauzy, J., Fernandes, P., Patria, L., & Cretenot, D. (2005). Reduction of sludge production form WWTP using thermal pretreatment and enhanced anaerobic methanisation. *Water Science Technology*, 267-273.
- Hankane, J. (2008). Simulation based interactive multiobjctive optimization in wasterwater treatment. *International conference on engineering optimization*. UK.

-
- Hanks, W. (2010). *Process optimization of petroleum refinery wastewater treatment facility using process Medellin and site biokinetic constants*. Hamilton ON, Canada: Hydromantis Environmental Software Solution.
- Hattori, A. (2008). Syntrophic acetate oxidizing microbes in methanogenic environments. *Microbes Environments*, 118-127.
- Henze, M., Van Loewenthal, R., & Ekama, G. (2008). *Biological wastewater Treatment: Principles, Modeling and Design*. London, UK: IWA Publishing.
- Hernandez, M., & Delgadillo M, L. (2010). Aplicacion del modelo ADM1 en la digestion anaerobia de aguas residuales y desechos solidos. *El sevier*, 150-155.
- INEGI. (Agosto de 2013). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Obtenido de www.inegi.org.mx
- INEGI. (Agosto de 2013). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Obtenido de www.inegi.org.mc
- INEGI. (Agosto 2013). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía, obtenidos de la base de datos estadísticos* . www.inegi.org.mx.
- Instituto Nacional de Ecologia. (2005). *Generation and composition of municipal solid waste*. Mexico DF: www.2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/128/cap3.html.
- J, M.-Á. (2003). Biomethanization of the organic fraction of municipal solid waste. *International water Association*, 1-14.
- Jimenez, B. (2001). *La contaminacion ambiental en mexico: causas, efectos y tecnologia apropiada*. Mexico: Limusa.

-
- Korniluz, K., & Montusiewicz, A. (2008). Simulation of wastewater treatment system with membrane separation . *Proceeding of ecopole*, 20-69.
- Liu, Y., & Whitman, W. (2008). Metabolic, Phylogenetic and ecological diversity of methanogenic archaea. *Annals of the New York Academy of Science*, 171-189.
- Mendez, J., Gonzalez, C., Alvarado-Lassman, A., Alvarado-Kinnell, G., & Martinez-Delgadillo, S. (2008). Fecal bacteria survival in ammonia treated wastewater dewatered sludge. *Revista Mexicana de Ingenieria Quimica*, 229-235.
- Metcalf & Eddy. (1991). *Ingenieria Sanitaria: Tratamiento, evacuacion y reutilizacion de aguas residuales*. Barcelona: Labor .
- Mokosz, J. (2010). Simulating the effects of introduction of membrane filtration at a municipal BNR plant. *El Sevier*, 230-240.
- Narvaez, E. (2006). *Produccion de biosolidos por via anaerobia a partir de lodos primarios generados en una industria papelera*. Tesis de Maestria. Instituto Tecnologico de Orizaba, Veracruz, Mexico.
- Nguyen, P., KURUPARAN, P., & Visvanathan, C. (2007). Anaerobic digestion of municipal solid waste as a treatment prior to landfill . *Bioresource Technology*, 380-387.
- Oliver, B., Had-Sadok, Z., Dochain, D., & Genovisi, D. (2001). Dynamical Model Development and Parameter Identification for an Anaerobic Wastewater Treatment Process. *Biotechnology Bioenergy*, 424-438.
- Rossen, C., Vrecko, D., Gernaey, K., & Pons, M. (2002). Implementing ADM1 for plant-wide benchmark simulations in Matlab/Simulink. *Water Science and Technology*, 11-19.

-
- S,J, K., Olmstead, D., Shraa, D., Rhu, D., Kim, J., & Min, D. (2012). Control Parameters in an Activated Anaerobic Digestion with Membrane Filtration System. *BKT Technologies*, 4369-4385.
- SEDEMA. (2013). *Secretaria del Medio Ambiente*. Obtenido de www.veracruz.gob.mx/medioambiente/
- SEMARNAT. (Agosto de 2013). *Secretaria del medio Ambiente y Recursos Naturales*. Obtenido de Base de datos estadisticos : www.semarnat.gob.mx
- SEMARNAT;. (Noviembre de 2011). *Gestion integral de los Residuos en Mexico, Residuos Solidos Organicos*. Guadalajara, Jalisco, Mexico.
- Sotemann, S., Ristow, N., Wentzel, M., & Ekama, G. (2005). A Steady State model of anaerobic Digestion of Sewage Sludges. *Water SA*, 511-527.
- Wayne, J. (2005). Application of the ADM1 model to Advanced Anaerobic Digestion. *Bioresource Technology*, 1832-1842.
- Wichern, M., Gehring, T., Fischer, K., & Andrade D. (2009). Monofermentation of grass silage under mesophilic conditions: Measurements and mathematical modeling with ADM1. *Bioresource Technology*, 1675-1681.
- Wilhelm Sotemann, S. (2006). *Modelling Material Mass Balances over Wastewater Treatment Plants*. Thesis Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy, University of Cape Town.
- Yang, X., Wang, X., & Wang, L. (2010). Transferring of components and energy output in industrial sewage sludge disposal by thermal pretreatment and two-phase anaerobic process. *Bioresource Technology*, 2580-2584.

- Zaher, U., Cheong, D., Wu, B., Chen, S., & Olympia, W. (Junio de 2012). *Department of Biological System Engineering WSU*. Obtenido de Department of Biological System Engineering WSU: www.ecy.wa.gov/programs/swfa/solidwastedata/
- Zehnder, A. (1978). *Ecology of methane formation in water pollution Microbiology*. USA: John Wiley & Sons.
- Zheng, J., Kennedy, K., & Eskicioglu, C. (2009). Effecto of low temperature microwave Pretreatment on Characteistics and mesophilic sigestion of primary sludge. *Enviromental Technology*, 319-327.

ANEXOS

ANEXO (A)

Parametros y Sugerencias en el Software

GPS-X

ANEXO (A)

Una manera de obtener algunos de estos parámetros requeridos por el software, lo podemos encontrar en la sección de apoyo al usuario, siendo esta una de gran ayuda, proporcionándonos sugerencias para la obtención de dichos parámetros, estos se muestran en las siguientes tablas:

Parámetros	Sugerencias
Cationes	Debe ser medido o estimado o se puede establecer en el valor de (Carbono Inorgánico) Ubicado en estado en ADM1
Aniones	Debe de ser medido o estimado o puede establecerse un valor
Ácidos Grasos con cadena larga	Estado del nitrógeno inorgánico en ADM1
Valerato total	Debe de ser estimado o medido, es la parte de sólidos solubles en el Influyente
Butirato total	Debe de ser estimado o medido, es la parte de sólidos solubles en el Influyente
Propionato total	Debe de ser estimado o medido, es la parte de sólidos solubles en el Influyente
Acetato total	Debe de ser estimado o medido, es la parte de sólidos solubles en el Influyente
Hidrógeno (Gas)	Se ajusta a cero
Metano (Gas)	Se ajusta a cero
Proteína	Debe ser medido o estimado. es parte de Xs en el objeto de influente
Biomasa que degrada el azúcar	Se ajusta a cero

Biomasa que degrada los aminoácidos	Se ajusta a cero
Biomasa que degrada los ácidos grasos con cadena larga	Se ajusta a cero
Biomasa que degrada el valerato y butirato	Se ajusta a cero
Biomasa que degrada el propionato	Se ajusta a cero
Biomasa que degrada el acetato	Se ajusta a cero
Biomasa que degrada el Hidrógeno.	Se ajusta a cero

Librería de sugerencias del simulador GPS-X (cont.)

Cont. ANEXO (A)

VARIABLES DE ESTADO ADM1 ESTABLECIDOS EN EL OBJETO INFLUENTE

Cuando la corriente de entrada está representada por un objeto influente, el modelo de estados influente se debe utilizar en el objeto influente. Algunos de los estados son estados ADM1 y éstos necesitan ser estimados. Algunos estados no son necesarios para el modelo ADM1 y pueden ignorarse. Algunos otros estados forman una fracción de un estado ADM1 y cuando se suman necesitan corresponder a los valores introducidos en el afluente del objeto ADM1. Descripción más detallada se da a continuación.

Parámetros	Sugerencias
Sólidos Inorgánico suspendido	Este puede ser medido o estimado. Este no es un estado ADM1 pero puede impactar en la concentración de sólidos
Material Orgánico soluble	Igual que los sólidos inorgánicos en el ADM1
Sustrato de fácil biodegradabilidad	Es la suma de monosacáridos, amino ácido, Ácidos grasos de cadena larga, Valerato total, Butirato total, Propionato, acetato total, y carbohidrato estado ADM1. Asegurarse de que estos valores sean la suma de los valores introducidos para estos estados en la corriente del influente del modelo ADM1
Partículas de materia orgánica	Igual que Xi, estado de modelo ADM1
Sustrato lentamente biodegradable	Se suma los compuestos de proteína y lípidos que afirma el modelo ADM1, el cual debe asegurarse que esos valores sean

	la suma de los valores declarados a estos estados en la corriente del influente ADM1
Biomasa heterótrofa activa	Se asigna el valor de cero, a menos que se tenga una estimación
Biomasa autótrofa activa	Se asigna el valor de cero, a menos que se tenga una estimación.
Partículas unbiodegradables de descomposición celular	Se convierte en parte del estado Xi en el modelo ADM1 a menos que sepa usar Xu y Xi arriba y ajusta este a cero.
Producto de almacenamiento celular interna	No se usa.
Oxígeno disuelto	No es usado por el modelo ADM1 pero es usado por el GPS-X para estimar la demanda química de oxígeno en el influente. Se asume que tanto el oxígeno como nitrato se reduce instantáneamente al entrar al ambiente anaerobio, por lo que la DQO total entrante se reduce en esta demanda DQO entrante para compensar la reducción de los aceptores de electrones presentes en la corriente entrante.
Amoniaco libre y ionizado	Sin estado en el modelo ADM1 (Nitrógeno inorgánico). Asegurarse que se utilizan las unidades correctas.
Nitrógeno orgánico soluble biodegradable	$(\text{fracción de nitrógeno en aminoácidos}=0.098) \times \text{concentración aminoácidos}$

<p>Partículas de nitrógeno orgánico biodegradable</p>	<p>Se usan las siguientes formulas :</p> $X_{nd} = \text{total TKN} - S_{nd} - S_{nh} - in_xu (X_i)$ $\text{Total TKN} = S_{in} + N_i \times S_i + N_i \times (X_i + X_u) + N_{aa} \times S_{aa} + N_{xc} \times X_c$ <p>Donde</p> <p>S_{nd} = conc. Soluble de nitrógeno orgánico biodegradable</p> <p>S_{nh} = conc. Amoniacó libre y ionizado</p> <p>in_xu = fracción de partículas de nitrógeno un biodegradable de descomposición celular (0.68 en mantis, 0.06 en ASM1)</p> <p>in_xi = fracción de nitrógeno de partículas inertes (0.068 in mantis , 0.06 en ASM1)</p> <p>X_u = conc. Partículas un biodegradables de descomposición celular</p> <p>N_i = fracción de nitrogeno S_i y X_i</p> <p>S_i = concentración inerte soluble</p> <p>X_i = concentración de partículas inertes</p> <p>N_{aa} = fracción de nitrógeno de aminoácidos (0.098)</p> <p>S_{aa} = concentración de aminoácidos</p> <p>N_{xc} = fracción de nitrógeno de compuestos (0.0376)</p> <p>X_c = concentración de compuestos</p>
<p>Nitrito y nitrato</p>	<p>No en ADM1 pero es utilizado por GPS-X para estimar la demanda de DQO de la corriente del influente. Se supone que tanto el oxígeno como el nitrato se reduce instantáneamente al entrar en el ambiente anaerobio, por lo que la DQO total entrante se reduce en esta demanda de DQO entrante para</p>

	compensar la reducción de los aceptores de electrones presentes en la corriente entrante.
Dinitrógeno	Asigna valor de cero
Alcalinidad	Sic estado ADM1 (carbono inorgánico)

Tabla 0-1(Cont) Variables de estado ADM1 establecidos

ANEXO (B)
Ecuaciones Diferenciales
Modelo UCTADM1

ANEXO B

Desarrollo de las Ecuaciones Diferenciales, obtenidas en el Modelo UCTADM1

$$C1 \downarrow = \frac{dNH_4}{dt} = -1 \frac{\mu_{\max,AD} [S_{bsf}]}{K_{S,AD} + [S_{bsf}]} \left\{ 1 - \frac{[H_2]}{K_{H_2} + [H_2]} \right\} [Z_{AD}] - 1 \frac{\mu_{\max,Ac} [HPr]}{K_{S,Ac} + [HPr]} \left\{ 1 - \frac{[H_2]}{K_{H_2} + [H_2]} \right\} [Z_{Ac}] - 1 \frac{\mu_{\max,A_M} [HA_C]}{K_{S,A_M} + [HA_C]} [Z_{AM}] - 1 \frac{\mu_{\max,H_M} [H_2]}{K_{S,H_M} + [H_2]} [Z_{HM}]$$

$$C1 \uparrow = \frac{dNH_4}{dt} = -1 \frac{\mu_{\max,AD} [S_{bsf}]}{K_{S,AD} + [S_{bsf}]} \left\{ \frac{[H_2]}{K_{H_2} + [H_2]} \right\} [Z_{AD}] - 1 \frac{\mu_{\max,Ac} [HPr]}{K_{S,Ac} + [HPr]} \left\{ 1 - \frac{[H_2]}{K_{H_2} + [H_2]} \right\} [Z_{Ac}] - 1 \frac{\mu_{\max,A_M} [HA_C]}{K_{S,A_M} + [HA_C]} [Z_{AM}] - 1 \frac{\mu_{\max,H_M} [H_2]}{K_{S,H_M} + [H_2]} [Z_{HM}]$$

$$C2 = \frac{dNH_3}{dt} = A \left[\frac{K_{\max,HYD} \left[\frac{S_{bp}}{Z_{AD}} \right]}{K_{SS,HYD} + \left[\frac{S_{bp}}{Z_{AD}} \right]} \right] [Z_{AD}] + \frac{Y + 4X - 2Z - 23A}{Y + 4X - 2Z - 3A} bZ [Z_{Ac}] + \frac{Y + 4X - 2Z - 23A}{Y + 4X - 2Z - 3A} bZ [Z_{AD}] + \frac{Y + 4X - 2Z - 23A}{Y + 4X - 2Z - 3A} bZ [Z_{AM}] + \frac{Y + 4X - 2Z - 23A}{Y + 4X - 2Z - 3A} bZ [Z_{HM}]$$

$$C3 \downarrow = \frac{dH_2CO_3}{dt} = 1P_6 - 1P_7 + \frac{2Z + 3A - Y}{4} \left[\frac{K_{\max,HYD} \left(\frac{S_{bp}}{Z_{AD}} \right)}{K_{SS,HYD} + \left(\frac{S_{bp}}{Z_{AD}} \right)} \right] [Z_{AD}] + 2 \left(\frac{1 - \frac{5}{6} Y_{AD}}{Y_{AD}} \right) \left[\frac{\mu_{\max,AD} [S_{bsf}]}{K_{S,AD} + [S_{bsf}]} \right] \left[1 - \frac{H_2}{KH_2 + H_2} \right] [Z_{AD}] + \frac{5(Y - 2Z - 3A)}{Y + 4X - 2Z - 3A} bZ [z] + 1 - \frac{2Y_{AC}}{Y_{AC}} \left[\frac{\mu_{\max,Ac} [HP]}{K_{S,Ac} + [HP]} \right] \left[1 - \frac{H_2}{KH_2 + H_2} \right] [Z_{Ac}] + \frac{5(Y - 2Z - 3A)}{Y + 4X - 2Z - 3A} bZ [z] + \frac{\left(1 - \frac{5}{2} Y_{AM} \right)}{Y_{AM}} \left[\frac{\mu_{\max,AM} [HA_C]}{K_{S,Ac} + [HA_C]} \right] [Z_{AM}] + \frac{5(Y - 2Z - 3A)}{Y + 4X - 2Z - 3A} bZ [z] + \frac{(1 + 10Y_{HM})}{4Y_{HM}} \left[\frac{\mu_{\max,HM} [H_2]}{K_{S,HM} + [H_2]} \right] [Z_{HM}] + \frac{5(Y - 2Z - 3A)}{Y + 4X - 2Z - 3A} bZ [z]$$

$$C3 \uparrow = \frac{dH_2CO_3}{dt} = 1P_6 - 1P_7 + \frac{2Z + 3A - Y}{4} \left[\frac{K_{\max,HYD} \left(\frac{S_{bp}}{Z_{AD}} \right)}{K_{SS,HYD} + \left(\frac{S_{bp}}{Z_{AD}} \right)} \right] [Z_{AD}] + \left(\frac{1 - \frac{5}{6} Y_{AD}}{Y_{AD}} \right) \left[\frac{\mu_{\max,AD} [S_{bsf}]}{K_{S,AD} + [S_{bsf}]} \right] \left[\frac{H_2}{KH_2 + H_2} \right] [Z_{AD}] + \frac{5(Y - 2Z - 3A)}{Y + 4X - 2Z - 3A} bZ [z] + \frac{1 - 2Y_{AC}}{Y_{AC}} \left[\frac{\mu_{\max,Ac} [HP]}{K_{S,Ac} + [HP]} \right] \left[1 - \frac{H_2}{KH_2 + H_2} \right] [Z_{Ac}] + \frac{5(Y - 2Z - 3A)}{Y + 4X - 2Z - 3A} bZ [z] + \frac{\left(1 - \frac{5}{2} Y_{AM} \right)}{Y_{AM}} \left[\frac{\mu_{\max,AM} [HA_C]}{K_{S,Ac} + [HA_C]} \right] [Z_{AM}] + \frac{5(Y - 2Z - 3A)}{Y + 4X - 2Z - 3A} bZ [z] + \frac{(1 + 10Y_{HM})}{4Y_{HM}} \left[\frac{\mu_{\max,HM} [H_2]}{K_{S,HM} + [H_2]} \right] [Z_{HM}] + \frac{5(Y - 2Z - 3A)}{Y + 4X - 2Z - 3A} bZ [z]$$

$$C7 \downarrow = \frac{dH}{dt} = 1 \frac{\mu_{\max,AD} [S_{bsf}]}{K_{S,AD} + [S_{bsf}]} \left\{ 1 - \frac{[H_2]}{K_{H_2} + [H_2]} \right\} [Z_{AD}] + 1 \frac{\mu_{\max,Ac} [HPr]}{K_{S,Ac} + [HPr]} \left\{ 1 - \frac{[H_2]}{K_{H_2} + [H_2]} \right\} [Z_{Ac}] + 1 \frac{\mu_{\max,A_M} [HA_C]}{K_{S,A_M} + [HA_C]} [Z_{AM}] + 1 \frac{\mu_{\max,H_M} [H_2]}{K_{S,H_M} + [H_2]} [Z_{HM}]$$

$$C7 \uparrow = \frac{dH}{dt} = 1 \frac{\mu_{\max,AD} [S_{bsf}]}{K_{S,AD} + [S_{bsf}]} \left\{ \frac{[H_2]}{K_{H_2} + [H_2]} \right\} [Z_{AD}] + 1 \frac{\mu_{\max,Ac} [HPr]}{K_{S,Ac} + [HPr]} \left\{ 1 - \frac{[H_2]}{K_{H_2} + [H_2]} \right\} [Z_{Ac}] + 1 \frac{\mu_{\max,A_M} [HA_C]}{K_{S,A_M} + [HA_C]} [Z_{AM}] + 1 \frac{\mu_{\max,H_M} [H_2]}{K_{S,H_M} + [H_2]} [Z_{HM}]$$

$$C13 \downarrow = \frac{dH_{Ac}}{dt} = \frac{2 \left(1 - \frac{5}{6} Y_{AD} \right)}{Y_{AD}} \left[\frac{\mu_{\max,AD} [S_{bsf}]}{K_{S,AD} + [S_{bsf}]} \right] \left\{ 1 - \frac{[H_2]}{K_{H_2} + [H_2]} \right\} [Z_{AD}] + \frac{1 - \frac{3}{2} Y_{AC}}{Y_{AC}} \left[\frac{\mu_{\max,Ac} [HPr]}{K_{S,Ac} + [HPr]} \right] \left\{ 1 - \frac{[H_2]}{K_{H_2} + [H_2]} \right\} [Z_{Ac}] - \frac{1}{Y_{AM}} \left[\frac{\mu_{\max,A_M} [HA_C]}{K_{S,A_M} + [HA_C]} \right] [Z_{AM}]$$

$$C13 \uparrow = \frac{dH_{Ac}}{dt} = \frac{\left(1 - \frac{5}{6} Y_{AD} \right)}{Y_{AD}} \left[\frac{\mu_{\max,AD} [S_{bsf}]}{K_{S,AD} + [S_{bsf}]} \right] \left\{ \frac{[H_2]}{K_{H_2} + [H_2]} \right\} [Z_{AD}] + \frac{1 - \frac{3}{2} Y_{AC}}{Y_{AC}} \left[\frac{\mu_{\max,Ac} [HPr]}{K_{S,Ac} + [HPr]} \right] \left\{ 1 - \frac{[H_2]}{K_{H_2} + [H_2]} \right\} [Z_{Ac}] - \frac{1}{Y_{AM}} \left[\frac{\mu_{\max,A_M} [HA_C]}{K_{S,A_M} + [HA_C]} \right] [Z_{AM}]$$

$$C28 = \frac{dHPr}{dt} = \frac{\left(1 - \frac{5}{6}Y_{AD}\right)}{Y_{AD}} \left[\frac{\mu_{\max,AD} [S_{bsf}]}{K_{S,AD} + [S_{bsf}]} \right] \left\{ \frac{[H_2]}{K_{H_2} + [H_2]} \right\} [Z_{AD}] - \frac{1}{Y_{Ac}} \left[\frac{\mu_{\max,Ac} [HPr]}{K_{S,Ac} + [HPr]} \right] \left\{ 1 - \frac{[H_2]}{K_{H_2} + [H_2]} \right\} [Z_{Ac}]$$

$$P4 = \frac{dCH_4}{dt} = \frac{\left(1 - \frac{5}{2}Y_{AM}\right)}{Y_{AM}} \left[\frac{\mu_{\max,AM} [H_{Ac}]}{K_{S,AM} + [H_{Ac}]} \right] [Z_{AM}] + \frac{(1-10Y_{HM})}{4Y_{HM}} \left[\frac{\mu_{\max,HM} [H_2]}{K_{S,HM} + [H_2]} \right] [Z_{HM}]$$

$$D1 = \frac{dC_X H_Y O_Z N_A}{dt} = -1 \left[\frac{K_{\max,HYD} \left[\frac{[S_{bp}]}{[Z_{AD}]} \right]}{K_{ss,HYD} + \left[\frac{[S_{bp}]}{[Z_{AD}]} \right]} \right] [Z_{AD}] + \frac{20}{Y+4X-Z-3A} b_Z [Z_{Ac}] + \frac{20}{Y+4X-Z-3A} b_Z [Z_{AM}] + \frac{20}{Y+4X-Z-3A} b_Z [Z_{HM}]$$

$$D2 \downarrow = \frac{dC_6 H_{12} O_6}{dt} = \frac{Y+4X-2Z-3A}{24} \left[\frac{K_{\max,HYD} \left[\frac{[S_{bp}]}{[Z_{AD}]} \right]}{K_{ss,HYD} + \left[\frac{[S_{bp}]}{[Z_{AD}]} \right]} \right] [Z_{AD}] - \frac{1}{Y_{AD}} \left[\frac{\mu_{\max,AD} [S_{bsf}]}{K_{S,AD} + [S_{bsf}]} \right] \left\{ 1 - \frac{[H_2]}{K_{H_2} + [H_2]} \right\} [Z_{AD}]$$

$$D2 \uparrow = \frac{dC_6 H_{12} O_6}{dt} = \frac{Y+4X-2Z-3A}{24} \left[\frac{K_{\max,HYD} \left[\frac{[S_{bp}]}{[Z_{AD}]} \right]}{K_{ss,HYD} + \left[\frac{[S_{bp}]}{[Z_{AD}]} \right]} \right] [Z_{AD}] - \frac{1}{Y_{AD}} \left[\frac{\mu_{\max,AD} [S_{bsf}]}{K_{S,AD} + [S_{bsf}]} \right] \left\{ \frac{[H_2]}{K_{H_2} + [H_2]} \right\} [Z_{AD}]$$

$$D2 \downarrow = \frac{dH_2}{dt} = \frac{4\left(1 - \frac{5}{6}Y_{AD}\right)}{Y_{AD}} \left[\frac{\mu_{\max,AD} [S_{bsf}]}{K_{S,AD} + [S_{bsf}]} \right] \left\{ 1 - \frac{[H_2]}{K_{H_2} + [H_2]} \right\} [Z_{AD}] + \frac{3-4Y_{AC}}{Y_{AC}} \left[\frac{\mu_{\max,AC} [HP_r]}{K_{S,AC} + [HP_r]} \right] \left\{ 1 - \frac{[H_2]}{K_{H_2} + [H_2]} \right\} [Z_{Ac}] - \frac{1}{Y_{HM}} \left[\frac{\mu_{\max,HM} [H_2]}{K_{S,HM} + [H_2]} \right] [Z_{HM}]$$

$$D2 \uparrow = \frac{dH_2}{dt} = \frac{\left(1 - \frac{5}{6}Y_{AD}\right)}{Y_{AD}} \left[\frac{\mu_{\max,AD} [S_{bsf}]}{K_{S,AD} + [S_{bsf}]} \right] \left\{ \frac{[H_2]}{K_{H_2} + [H_2]} \right\} [Z_{AD}] + \frac{3-4Y_{AC}}{Y_{AC}} \left[\frac{\mu_{\max,AC} [HP_r]}{K_{S,AC} + [HP_r]} \right] \left\{ 1 - \frac{[H_2]}{K_{H_2} + [H_2]} \right\} [Z_{Ac}] - \frac{1}{Y_{HM}} \left[\frac{\mu_{\max,HM} [H_2]}{K_{S,HM} + [H_2]} \right] [Z_{HM}]$$

$$D4 \downarrow = \frac{dZ_{AD}}{dt} = 1 \left[\frac{\mu_{\max,AD} [S_{bsf}]}{K_{S,AD} + [S_{bsf}]} \right] \left\{ 1 - \frac{[H_2]}{K_{H_2} + [H_2]} \right\} [Z_{AD}] - 1b_Z [Z]$$

$$D4 \uparrow = \frac{dZ_{AD}}{dt} = 1 \left[\frac{\mu_{\max,AD} [S_{bsf}]}{Ks_{,AD} + [S_{bsf}]} \right] \left\{ \frac{[H_2]}{K_{H2} + [H_2]} \right\} [Z_{AD}] - 1b_Z [Z_{AD}]$$

$$D5 = \frac{dZ_{AC}}{dt} = 1 \left[\frac{\mu_{\max,AC} [HP_r]}{Ks_{,AC} + [HP_r]} \right] \left\{ 1 - \frac{[H_2]}{K_{H2} + [H_2]} \right\} [Z_{Ac}] - 1b_Z [Z_{Ac}]$$

$$D6 = \frac{dZ_{AM}}{dt} = 1 \left[\frac{\mu_{\max,AM} [H_{Ac}]}{Ks_{,AM} + [H_{Ac}]} \right] [Z_{AM}] - 1b_Z [Z_{AM}]$$

$$D7 = \frac{dZ_{HM}}{dt} = 1 \left[\frac{\mu_{\max,HM} [H_2]}{Ks_{,HM} + [H_2]} \right] [Z_{HM}] - 1b_Z [Z_{HM}]$$

ANEXO (C)

Programacion del Modelo UCTADM1

En Aquasim

Anexo C

Programación del Modelo UCTADM1 en el software Aquasim

AQUASIM Version 2.1g (win/mfc) - Listing of System Definition

Date and time of listing: 03/24/2015 07:20:19

IQ. Enrique Delgado Alvarado
 Maestría en Ciencias en Ingeniería Química
 Instituto Tecnológico de Orizaba
 Modelo UCTADM1

Variables

AAA_README:	Description:	Nomenclatura: pH = -log10(H+): actividad, i . e . pH = -log10[[H+] fm] y no pH = -log10 [H+] (i i) c orregido Ka y Kp , que sonn en realidad K a y k p
	Type:	Constant Variable
	Unit:	
	Value:	0.1
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	1
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

ALK:	Description:	H2CO3 Alcalinidad en el digestor
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mg/l
	Expression:	ALKmol*MW_CaCO3*1000

ALKmol:	Description:	H2CO3 alcalinidad en el digestor
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	2*C5_CO3+C4_HCO3+C8_OH-C7_H

AW_C:	Description:	Peso atomico del carbon
	Type:	Constant Variable

	Unit:	amu
	Value:	12.011
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	20
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

AW_H:	Description:	Peso atomico del Hidrogeno
	Type:	Constant Variable
	Unit:	amu
	Value:	1.0079
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	20
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

AW_N:	Description:	Peso atomico del Nitrogeno
	Type:	Constant Variable
	Unit:	amu
	Value:	14.007
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	20
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

AW_O:	Description:	Peso atomico del oxigeno
	Type:	Constant Variable
	Unit:	amu
	Value:	15.999
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	20
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

AW_P:	Description:	Peso atomico del fosforo
	Type:	Constant Variable
	Unit:	amu
	Value:	15.999
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	20
	Sensitivity Analysis:	inactive

```

Parameter Estimation: inactive
-----
AW_S:      Description:      Peso atomico del Sulfar
           Type:            Constant Variable
           Unit:            amu
           Value:          32.066
           Standard Deviation: 1
           Minimum:        0
           Maximum:        40
           Sensitivity Analysis: inactive
           Parameter Estimation: inactive
-----
B1_CODus:  Description:      conc.DQO soluble no biodegradable
           Type:            Dyn. Volume State Var.
           Unit:            gram COD/l - NNB! !
           Relative Accuracy: 1e-006
           Absolute Accuracy: 1e-006
-----
B3_CODup:  Description:      conc- de particulas de DQO no biodegradables
           Type:            Dyn. Volume State Var.
           Unit:            gram COD/l - NNB ! !
           Relative Accuracy: 1e-006
           Absolute Accuracy: 1e-006
-----
bas:       Description:      taza de mortalidad SRB acetotrofica
           Type:            Constant Variable
           Unit:            /d
           Value:          0.0275
           Standard Deviation: 1
           Minimum:        0
           Maximum:        10
           Sensitivity Analysis: inactive
           Parameter Estimation: inactive
-----
bhs:       Description:      Tasa de muerte SRB hidrogenotrofica
           Type:            Constant Variable
           Unit:            /d
           Value:          0.06
           Standard Deviation: 1
           Minimum:        0
           Maximum:        10
           Sensitivity Analysis: inactive
           Parameter Estimation: inactive
-----
bps:       Description:      tasa de muerte SRB de propionico de

```

	Type:	gradado
	Unit:	Constant Variable
	Value:	/d
	Standard Deviation:	0.0185
	Minimum:	1
	Maximum:	0
	Sensitivity Analysis:	10
	Parameter Estimation:	inactive

b_AC:	Description:	tasa de mortalidad especifica en la acetogenesis
	Type:	Constant Variable
	Unit:	/d
	Value:	0.015
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

b_AD:	Description:	tasa de mortalidad especifica en la acidogenesis
	Type:	Constant Variable
	Unit:	/d
	Value:	0.041
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

b_AM:	Description:	tasa de mortalidad especifica en la metanogenesis acetoclastica
	Type:	Constant Variable
	Unit:	/d
	Value:	0.037
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

b_HM:	Description:	tasa de mortalidad especifica en la Metanogenesis Hidrogenotrofica
	Type:	Constant Variable

	Unit:	/d
	Value:	0.01
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

C10_H2PO4:	Description:	concentracion molar disuelta de H2P O4
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	mol/l
	Relative Accuracy:	1e-006
	Absolute Accuracy:	1e-006

C11_HPO4:	Description:	concentracion molar disuelto de HPO 4 ion
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	mol/l
	Relative Accuracy:	1e-006
	Absolute Accuracy:	1e-006

C12_PO4:	Description:	concentracion molar disuelto de PO4 ion
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	mol/l
	Relative Accuracy:	1e-006
	Absolute Accuracy:	1e-006

C13_HAc:	Description:	concentracion molar de acido acetic o
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	mol/l
	Relative Accuracy:	1e-006
	Absolute Accuracy:	1e-006

C14_AC:	Description:	concentracion molar de ion acetato
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	mol/l
	Relative Accuracy:	1e-006
	Absolute Accuracy:	1e-006

C1_B10_NH4:	Description:	concentracion molar de ion amonio
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	mol/l
	Relative Accuracy:	1e-006

	Absolute Accuracy:	1e-006

C28_HPr:	Description:	concentracion molar de acido propionico
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	mol/l
	Relative Accuracy:	1e-006
	Absolute Accuracy:	1e-006

C29_Pr:	Description:	concentracion molar de ion propionato
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	mol/l
	Relative Accuracy:	1e-006
	Absolute Accuracy:	1e-006

C2_NH3:	Description:	concentracion molar de la solucion de amoniaco
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	mol/l
	Relative Accuracy:	1e-006
	Absolute Accuracy:	1e-006

C30_HSO4:	Description:	concentracion molar de sulfato
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	mol/l
	Relative Accuracy:	1e-006
	Absolute Accuracy:	1e-006

C31_SO4:	Description:	concentracion molar de SO4
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	mol/l
	Relative Accuracy:	1e-006
	Absolute Accuracy:	1e-006

C32_H2S:	Description:	concentracion de sulfuro de hidrogeno no disociado
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	moll/l
	Relative Accuracy:	1e-006
	Absolute Accuracy:	1e-006

C33_H2Sgas:	Description:	concentracion de H2S gaseoso
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	mol/l
	Relative Accuracy:	1e-006

	Absolute Accuracy:	1e-006

C34_HS:	Description:	concentracion de HS
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	mol/l
	Relative Accuracy:	1e-006
	Absolute Accuracy:	1e-006

C3_H2CO3:	Description:	concentracion molar de acido carbonico disuelto (H2CO3) mas (CO2)
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	mol/l
	Relative Accuracy:	1e-006
	Absolute Accuracy:	1e-006

C4_HCO3:	Description:	concentracion molar de ion bicarbonato disuelto
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	mol/l
	Relative Accuracy:	1e-006
	Absolute Accuracy:	1e-006

C5_CO3:	Description:	concentracion molar de ion carbonato disuelto
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	mol/l
	Relative Accuracy:	1e-006
	Absolute Accuracy:	1e-006

C7_H:	Description:	concentracion molar de ion disuelto de hidrogeno (protones)
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	mol/l
	Relative Accuracy:	1e-006
	Absolute Accuracy:	1e-006

C8_OH:	Description:	concentracion molar de ion OH
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	mol/l
	Relative Accuracy:	1e-006
	Absolute Accuracy:	1e-006

C9_H3PO4:	Description:	concentracion molar de acido fosforico disuelto
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	mol/l

	Relative Accuracy:	1e-006
	Absolute Accuracy:	1e-006

CT:	Description:	Concentracion total de especies de carbon disuelto en el digestor
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	C3_H2CO3+C4_HCO3+C5_CO3

D1_Sbp:	Description:	concentracion de particulas biodegradables de DQO
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	mol/l
	Relative Accuracy:	1e-006
	Absolute Accuracy:	1e-006

D2_B2_Sbsf:	Description:	concentracion de DQO soluble biodegradable = Glucosa
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	mol/l
	Relative Accuracy:	1e-006
	Absolute Accuracy:	1e-006

D3_H2:	Description:	concentracion de H2
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	mol/l
	Relative Accuracy:	1e-006
	Absolute Accuracy:	1e-006

D4_Z_AD:	Description:	concentracion de biomasa acidogenica
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	mol/l
	Relative Accuracy:	1e-006
	Absolute Accuracy:	1e-006

D5_Z_AC:	Description:	concentracion de biomasa acetogenica
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	mol/l
	Relative Accuracy:	1e-006
	Absolute Accuracy:	1e-006

D6_Z_AM:	Description:	concentracion de biomasa metanogenica Acetoclastica
	Type:	Dyn. Volume State Var.

	Unit:	mol/l
	Relative Accuracy:	1e-006
	Absolute Accuracy:	1e-006

D7_Z_HM:	Description:	concentracion de biomasa metanogeni ca hidrogenotrofica
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	mol/l
	Relative Accuracy:	1e-006
	Absolute Accuracy:	1e-006

EndogenousProt:	Description:	Paso intermedio para simplificar ca lculos en respiracion endogena
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	$(160 / (((HydrolysisProt / 2) * AW_O) / (AW_C * in_PsChon + AW_H * in_PscHon + AW_O * in_PschoN + AW_N * in_PschoN))) / (AW_C * in_PsChon + AW_H * in_PscHon + AW_O * in_PschoN + AW_N * in_PschoN)$

fd:	Description:	Coefficiente de Actividad Divalente
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	$10^{-(1.825e+006 * (78.3 * Tk)^{-1.5}) * ((2)^2) * (((0.000168 * SC)^{0.5}) / (1 + ((0.000168 * SC)^{0.5}))) - (0.3 * 0.000168 * SC)}$

fm:	Description:	Coefficiente de Actividad Monovalent e
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	$10^{-(1.825e+006 * (78.3 * Tk)^{-1.5}) * ((1)^2) * (((0.000168 * SC)^{0.5}) / (1 + ((0.000168 * SC)^{0.5}))) - (0.3 * 0.000168 * SC)}$

ft:	Description:	Coefficiente de Actividad Trivalente
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	$10^{-(1.825e+006 * (78.3 * Tk)^{-1.5}) * ((3)^2) * (((0.000168 * SC)^{0.5}) / (1 + ((0.000168 * SC)^{0.5}))) - (0.3 * 0.000168 * SC)}$

f_C5H7O2NCOD:	Description:	DQO / racion de organismos
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mgDQO/mgorganismos
	Value:	1.4145559
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

H2CO3mol:	Description:	Estquiometria para la respiracion e ndogena para todos los grupos
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol
	Expression:	$(5*(in_PscHon-2*in_PschOn-3*in_PschonN))/((in_PscHon+4*in_PsChon-2*in_PschOn-3*in_PschoN))$

H2S_in:	Description:	Concentracion de H2S en el influente
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$(inH*HS_in)/KH2S$

H2S_init:	Description:	concentracion inicial de H2S en el reactor anaerobio
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$(sulphideT_init*vinit_H)/(vinit_H+KH2S)$

H2_in:	Description:	especies de H2 influente
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mol/l
	Value:	0.00035
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

Hin:	Description:	variable constante
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mol/l
	Value:	260
	Standard Deviation:	1

	Minimum:	0
	Maximum:	1000
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

HPr_init:	Description:	Concentracion inicial de Propionato en el reactor
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$(PT_init*vinit_H)/(vinit_H+Kp)$

HSO4_in:	Description:	influyente sulfato
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$(inH*SO4_in)/KHSO4$

HSO4_init:	Description:	cocentracion de sulfato en el reactor
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$(sulphate_T_init*vinit_H)/(vinit_H+KHSO4)$

HS_in:	Description:	Concentracion de HS en el influente
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$(KH2S*(sulphideT_in/1000/MWS))/(inH+KH2S)$

HS_init:	Description:	concentracion inicialde HS en el reactor anaerobio
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$(sulphideT_init*KH2S)/(vinit_H+KH2S)$

HydrolysisProt:	Description:	Paso intermedio para simplificar el calculo de Hidrolisis
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	$in_PscHon+(4*in_PsChon)-(2*in_PschoN)-(3*in_PschoN)$

inALK:	Description:	alcalinidad del influente
	Type:	Constant Variable
	Unit:	as mg/l CaCO3

	Value:	90.28
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10000
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

inALKmol:	Description:	conversion de alcalinidad a mol/l
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$(inALK/1000)/MW_CaCO3*2$

inCO3:	Description:	especies de CO3 en el influyente
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$(inALKmol-inOH-inH)/(2+(inH/Kc2))$

inCO3acidity:	Description:	acidez de CO3 en el influente
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$((1+((2*inH)/Kc1))/(1+((2*Kc2)/inH))) * (inALKmol - (Kw/inH) + (inH/fm)) - (Kw/inH) + (inH/fm)$

inCT:	Description:	Total de especies de C disueltos en el influente
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$(inALKmol+inCO3acidity)/2$

inH:	Description:	H+ especies en el influente
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$(10^{(-inpH)})/fm$

inH2CO3:	Description:	especies H2CO3 en el influente
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$(inHCO3*inH)/Kc1$

inHCO3:	Description:	especies en el influente de HCO3
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$(inCO3*inH)/Kc2$

inNai:	Description:	influyente de amoniaco libre y soluc

	Type:	ion salina
	Unit:	Constant Variable
	Value:	mgN/l
	Standard Deviation:	8
	Minimum:	1
	Maximum:	0
	Sensitivity Analysis:	10000
	Parameter Estimation:	inactive

inNH3:	Description:	especies de NH3 en el influente
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$(Kn * ((inNai / 1000) / AW_N)) / (inH + Kn)$

inNH4:	Description:	Especies de NH4 en el influente
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$(inNH3 * inH) / Kn$

inOH:	Description:	especies en el influente de OH
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$(10^{-(14 - inpH)}) / fm$

inpH:	Description:	pH del influente
	Type:	Constant Variable
	Unit:	
	Value:	5.38
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	14
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

inSbpi:	Description:	DQO particulado en el influente que es biodegradable
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mgDQO/l
	Expression:	$inSpi - inSupi$

inSbpi_mol:	Description:	DQO particulado en el influente que es biodegradable
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$((inSbpi / in_f_CODPS) / 1000) / (AW_C * in$

		$\frac{in_PsChon+AW_H*in_PscHon+AW_O*in_PschOn+AW_N*in_PschoN}{inSbsaAAc_mol}$
inSbsaAAc_mol:	Description:	especies Ac Pc en el influente
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$(inSbsaAi_mol*Ka)/(inH+Ka)$
inSbsaAHAc_mol:	Description:	especies HAC en el influene
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$inSbsaAi_mol-inSbsaAAc_mol$
inSbsaAi:	Description:	DQO soluble en el influente que es Acido Acetico
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mgDQO/l
	Expression:	$inSbsai*in_f_HAcCOD*in_f_HAc$
inSbsaAi_mol:	Description:	influyente total de HAC + Ac
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$inSbsaAi/(in_f_HAcCOD*1000*MW_HAC)$
inSbsai:	Description:	SCFA en el DQO soluble del influent e de Acido acetico
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mgHAC/l
	Value:	155.59
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	100000
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive
inSbsaPHPr_mol:	Description:	especies HPr en el influente
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$inSbsaPi_mol-inSbsaPPr_mol$
inSbsaPi:	Description:	concentracion de DQO soluble en el influente que es Acido Propionico
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mgDQO/l
	Expression:	$inSbsai*in_f_HPrCOD*in_f_HPr$

inSbsaPi_mol:	Description:	influyente total de propionico
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$inSbsaPi / (in_f_HPrCOD * 1000 * MW_HPr)$

inSbsaPPr_mol:	Description:	especies Pr en el influente
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$(inSbsaPi_mol * Kp) / (inH + Kp)$

inSbsfi:	Description:	DQO soluble en el influente que no es SCFA
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mgDQO/l
	Expression:	$inSsi - inSusi - inSbsaAi - inSbsaPi$

inSC:	Description:	conductividad en el influente
	Type:	Constant Variable
	Unit:	ms/m
	Value:	208
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10000
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

inSpi:	Description:	influyente particulado de DQO
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mgDQO/l
	Expression:	$inSti / inSsi$

inSsi:	Description:	DQO soluble en el influente
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mgDQO/l
	Value:	292
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	100000
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

inSti:	Description:	influyente de DQO en g DQO/l
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mgDQO/l
	Value:	1950
	Standard Deviation:	1

	Minimum:	0
	Maximum:	100000
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

inSupi:	Description:	DQO particulado en el influente que es biodegradable
	Type:	Formula Variable
	Unit:	gDQO/l
	Expression:	inSti*in_f_sup

inSusi:	Description:	DQO soluble en el influente que es biodegradable
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mgDQO/l
	Expression:	inSti*in_f_Sus

in_f_CODPS:	Description:	DQO / CxHyOzNa
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mgDQO/mg lodo
	Expression:	((HydrolysisProt/2)*AW_O)/(AW_C*in_PsChon+AW_H*in_PscHon+AW_O*in_PschO n+AW_N*in_PschoN)

in_f_GlucCOD:	Description:	DQO/ glucosa
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mgDQO/mg glucosa
	Value:	1.0656835
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

in_f_H2COD:	Description:	DQO/H2
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mgDQO/mgH2
	Value:	7.9368
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

in_f_HAc:	Description:	fraccion de SCFA (en unidades de DQO) que es acido acetico

	Type:	Constant Variable
	Unit:	
	Value:	1
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

in_f_HAcCOD:	Description:	DQO/ HAC
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mgDQO/mgHAc
	Value:	1.06568
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

in_f_HPr:	Description:	fraccion de SCFA (en unidades de DQO) que es acido propioico
	Type:	Constant Variable
	Unit:	
	Value:	0
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

in_f_HPrCOD:	Description:	DQO/HPr
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mgDQO/mgHPr
	Value:	1.5118172
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

in_f_sup:	Description:	influyente de la fraccion de DQO total que no es biodegradable
	Type:	Constant Variable
	Unit:	
	Value:	0.3345
	Standard Deviation:	1

	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

in_f_Sus:	Description:	influyente de la fraccion total de D QO que no es biodegradable
	Type:	Constant Variable
	Unit:	
	Value:	0.008
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

in_PsChon:	Description:	proporcion relativa de carbon en la alimentacion del materia
	Type:	Constant Variable
	Unit:	
	Value:	4.31
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

in_PscHon:	Description:	proporcion relativa de hidrogeno en la alimentacion del material
	Type:	Constant Variable
	Unit:	
	Value:	7
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

in_PschOn:	Description:	proporcion relativa de oxigeno en l a alimentacion del material
	Type:	Constant Variable
	Unit:	
	Value:	3.03
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10

	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

in_PschoN:	Description:	proporcion relativa de nitrogeno en la alimentacion del material
	Type:	Constant Variable
	Unit:	
	Value:	0.24
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

Ka:	Description:	equilibrio constante para Hac
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	$(10^{(-pKa)}) / (fm^2)$

Kc1:	Description:	constante de equilibrio para H2CO3
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	$(10^{(-pKc1)}) / (fm^2)$

Kc2:	Description:	constante de equilibrio para HCO3
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	$(10^{(-pKc2)}) / (fd)$

Kfa:	Description:	constantede disociacion para Hac
	Type:	Formula Variable
	Unit:	/s
	Expression:	$Kra * ((10^{(-pKa)}) / (fm^2))$

kfc1:	Description:	Constante de disociacion para H2CO3
	Type:	Formula Variable
	Unit:	/s
	Expression:	$Krc1 * ((10^{(-pKc1)}) / (fm^2))$

kfc2:	Description:	constante de disociacion para HCO3
	Type:	Formula Variable
	Unit:	/s
	Expression:	$Krc2 * ((10^{(-pKc2)}) / (fd))$

kfH2S:	Description:	constante de disociacion para H2S
	Type:	Formula Variable

	Unit:	/s
	Expression:	$KrH2S * ((10^{(-pKH2S)}) / (fm^2))$

kfHSO4:	Description:	Disociacion para HSO4
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	$KrHSO4 * ((10^{(-pKHSO4)}) / fd)$

kfn:	Description:	constante de disociacion para NH4
	Type:	Formula Variable
	Unit:	/s
	Expression:	$Krn * (10^{(-pKn)})$

kfp1:	Description:	constante de disociacion para H3PO4
	Type:	Formula Variable
	Unit:	/s
	Expression:	$Krp1 * ((10^{(-pKp1)}) / (fm^2))$

kfp2:	Description:	constante de disociacion para H2PO4
	Type:	Formula Variable
	Unit:	/s
	Expression:	$Krp2 * ((10^{(-pKp2)}) / (fd))$

kfp3:	Description:	constante de disociacion para HPO4
	Type:	Formula Variable
	Unit:	/s
	Expression:	$Krp3 * ((10^{(-pKp3)}) * (fd / (ft * fm)))$

kfpr:	Description:	constante de disociacion para Hpr
	Type:	Formula Variable
	Unit:	/s
	Expression:	$KrPr * ((10^{(-pKPr)}) / (fm^2))$

kfw:	Description:	constante de disociacion para H2O
	Type:	Formula Variable
	Unit:	/s
	Expression:	$Krw * ((10^{(-pKW)}) / (fm^2))$

KH2:	Description:	constante de inhibicion de Hidrogen o
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mol H2/ l
	Value:	6.25e-005
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10

Sensitivity Analysis: inactive		
Parameter Estimation: inactive		
KH2S:	Description:	Constante de equilibrio para H2S
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	$(10^{(-pKH2S)}) / (fm^2)$
KH2Sgas:	Description:	constante ley de Henry
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	$0.011 * \exp(-2300 * (1/Tk - 1/298.15))$
KHCO2:	Description:	constante de la ley de henry
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l.atm
	Expression:	$10^{(-pKHCO2)}$
KHSO4:	Description:	Constante de equilibrio para HSO4
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	$(10^{(-pKHSO4)}) / fd$
KImol_as:	Description:	inhibicion acetotofica SRB
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mols/l
	Expression:	$KI_as / MWH2S$
KImol_hs:	Description:	inhibicion hidrogenotrofica SRB
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mols/l
	Expression:	$KI_ps / MWH2S$
KImol_ps:	Description:	constante de inhibicion SRB propionato degradado
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mols/l
	Expression:	$KI_ps / MWH2S$
KI_as:	Description:	constante de inhibicion Acetotrofica
	Type:	Constant Variable
	Unit:	gs/l
	Value:	0.164
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0

	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

KI_hs:	Description:	constante de inhibicion Hidrogenotr ofica SRB
	Type:	Constant Variable
	Unit:	gs/l
	Value:	0.55
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

KI_ps:	Description:	constante de inhibicion del propion ato degradado SRB
	Type:	Constant Variable
	Unit:	gs/l1
	Value:	0.185
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

Kmax_Hyd:	Description:	constante de velocidad maxima para Hidrolisis
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mol Sbp/mol ZAD
	Value:	1.743
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	1000
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

Kn:	Description:	constante de equilibrio para NH3
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	$10^{(-pKn)}$

KNmol_as:	Description:	constante de saturacion para el sufa to Acetotrofico
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol sustrato /l

	Expression:	KN_as/MWHSO4
KNmol_hs:	Description:	constante de saturacion del sulfato Hidrogenotrofico
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol sustrato /l
	Expression:	KN_hs/MWHSO4
KNmol_ps:	Description:	constante de saturacion para el sustrato del propionato degradado
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol sustrato/ l
	Expression:	KN_ps/MWHSO4
KN_as:	Description:	constante de saturacion para el sulfato acetotrofico
	Type:	Constant Variable
	Unit:	g/l
	Value:	0.0192
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive
KN_hs:	Description:	constante de saturacion para el sulfato Hidrogenotrofico
	Type:	Constant Variable
	Unit:	g/l
	Value:	0.0192
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive
KN_ps:	Description:	concentracion de saturacion para el sulfato propionato degradado SRB
	Type:	Constant Variable
	Unit:	g/ l
	Value:	0.0074
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

Kp:	Description:	Constante de equilibrio para HPr
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	$(10^{(-pKPr)}) / (fm^2)$
Kra:	Description:	constante de disociacion reversible para Hac
	Type:	Constant Variable
	Unit:	/s
	Value:	10000000
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	1e+015
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive
Krc1:	Description:	constante de disociacion reversible para H2CO3
	Type:	Constant Variable
	Unit:	/s
	Value:	10000000
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	1e+010
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive
Krc2:	Description:	constante de disociacion reversible para HCO3
	Type:	Constant Variable
	Unit:	/s
	Value:	1e+010
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	1e+010
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive
KrCO2:	Description:	constante de disociacion para la expulsion de CO2
	Type:	Constant Variable
	Unit:	/s
	Value:	1e+012
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0

	Maximum:	1e+015
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

KrH2S:	Description:	constante de disociacion reversible para H2S
	Type:	Constant Variable
	Unit:	/s
	Value:	1e+010
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	1e+015
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

KrH2Sgas:	Description:	constante de disociacion para expulsion de H2S
	Type:	Constant Variable
	Unit:	/s
	Value:	1e+012
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	1e+015
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

KrHSO4:	Description:	constante de disociacion reversible para HSO4 <-> H + SO4
	Type:	Constant Variable
	Unit:	/s
	Value:	1e+008
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	1e+015
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

Krn:	Description:	constante de disociacion reversible para NH4 <-> NH3 + H
	Type:	Constant Variable
	Unit:	/s
	Value:	1e+012
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	1e+015
	Sensitivity Analysis:	inactive

```

Parameter Estimation: inactive
-----
Krp1:      Description:      constante de disociacion reversible
           para H3PO4 <-> H2PO4 + H
           Type:            Constant Variable
           Unit:            /s
           Value:           1e+008
           Standard Deviation: 1
           Minimum:         0
           Maximum:         1e+010
           Sensitivity Analysis: inactive
           Parameter Estimation: inactive
-----
Krp2:      Description:      constante de disociacion reversible
           para H2PO4 <-> HPO4 + H
           Type:            Constant Variable
           Unit:            /s
           Value:           1e+012
           Standard Deviation: 1
           Minimum:         0
           Maximum:         1e+020
           Sensitivity Analysis: inactive
           Parameter Estimation: inactive
-----
Krp3:      Description:      constante de disociacion reversible
           para HPO4 <-> + H
           Type:            Constant Variable
           Unit:            /s
           Value:           1e+015
           Standard Deviation: 1
           Minimum:         0
           Maximum:         1e+020
           Sensitivity Analysis: inactive
           Parameter Estimation: inactive
-----
KrPr:      Description:      constante de disociacion reversible
           para HPr <-> Pr + H
           Type:            Constant Variable
           Unit:            /s
           Value:           10000000
           Standard Deviation: 1
           Minimum:         0
           Maximum:         1e+015
           Sensitivity Analysis: inactive
           Parameter Estimation: inactive
-----

```

Krw:	Description:	constante de disociacion reversibl e para H2O <-> OH(-) H
	Type:	Constant Variable
	Unit:	/s
	Value:	1e+010
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	1e+015
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

KSmol_as:	Description:	constante para el sustrato organico Acetotrofico SRB
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol sustrato/l
	Expression:	KS_as*((1/in_f_HAcCOD)/MW_HAC)

KSmol_hs:	Description:	constante de saturacion para el sus trato organico Hidrogenotrofico SRB
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol sustrato / l
	Expression:	KS_hs*((1/in_f_H2COD)/MWH2)

KSmol_ps:	Description:	constante de saturacion para el s ustrato organico del Propionato deg radado SRB
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol sustrato /l
	Expression:	KS_ps*((1/in_f_HPrCOD)/MW_HPr)

Ks_AC:	Description:	constante media de saturacion aceto genica
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mol sustrato/l
	Value:	0.0026786
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

Ks_AD:	Description:	constante medio de saturacion acido genica
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mol sustrato / l
	Value:	0.000781

	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

Ks_AM:	Description:	constante media de saturacion de la metanogenesis acetoclastica
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mol sustrato /l
	Value:	1.3e-005
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

KS_as:	Description:	constante media de saturacion para el sustrato organico acetotrofico S RB
	Type:	Constant Variable
	Unit:	gDQO/l
	Value:	0.024
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

Ks_HM:	Description:	constante medio de saturacion metanogenico Hidrogenotrofico
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mol sustrato /l
	Value:	0.000156
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

KS_hs:	Description:	concentracion media de saturacion para el sustrato organico hidrogenotrofico SRB
	Type:	Constant Variable
	Unit:	gDQO/l
	Value:	7e-005

	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

Ks_Hyd:	Description:	concentracion media de saturacion para la Hidrolisis
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mol Sbp / mol ZAD
	Value:	0.01485
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	1000
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

KS_ps:	Description:	concentracion media de saturacion para el sustrato organico propionato degradado SRB
	Type:	Constant Variable
	Unit:	gDQO/l
	Value:	0.295
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

Kw:	Description:	constante de equilibrio para el sistema del agua
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	$(10^{(-pKW)}) / (fm^2)$

K_NH4:	Description:	saturacion del lodo amonio
	Type:	Formula Variable
	Unit:	molN/l
	Expression:	0.01/18

muMAX_AC:	Description:	tasa maxima de crecimiento especifico para la acetogenesis
	Type:	Constant Variable
	Unit:	/d
	Value:	1.15
	Standard Deviation:	1

	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

muMAX_AD:	Description:	tasa maxima de crecimiento especifico para la acidogenesis
	Type:	Constant Variable
	Unit:	/d
	Value:	0.8
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

muMAX_AM:	Description:	tasa maxima de crecimiento especifico para la metanogenesis acetoclastica
	Type:	Constant Variable
	Unit:	/d
	Value:	0.3
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

muMAX_as:	Description:	tasa maxima de crecimiento especifico para la acetotrofica acetoclastica
	Type:	Constant Variable
	Unit:	/d
	Value:	0.612
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

muMax_HM:	Description:	tasa maxima de crecimiento especifico para la metanogenesis Hidrogenotrofico
	Type:	Constant Variable
	Unit:	/d
	Value:	0.86

	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

muMAX_hs:	Description:	tasa maxima de concentracion especifica hidrogenotrofico SRB
	Type:	Constant Variable
	Unit:	/d
	Value:	2.8
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

muMAX_ps:	Description:	tasa maxima de concentracion especifica para la degradacion del propio SRB
	Type:	Constant Variable
	Unit:	/d
	Value:	0.583
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

MWH2:	Description:	Peso molecular del H2
	Type:	Formula Variable
	Unit:	g
	Expression:	(2*AW_H)

MWH2S:	Description:	Peso molecular del H2S
	Type:	Formula Variable
	Unit:	g
	Expression:	(2*AW_H)+AW_S

MWHS:	Description:	Peso molecular del HS
	Type:	Formula Variable
	Unit:	g
	Expression:	(AW_H)+AW_S

MWHSO4:	Description:	Peso molecular del HSO4
	Type:	Formula Variable

	Unit:	g
	Expression:	$AW_H+AW_S+(4*AW_O)$
MWS:	Description:	Peso molecular del S
	Type:	Formula Variable
	Unit:	g
	Expression:	AW_S
MWSO4:	Description:	Peso molecular de HSO4
	Type:	Formula Variable
	Unit:	g
	Expression:	$AW_S+(4*AW_O)$
MW_C5H7O2N:	Description:	Peso molecular de los organismos
	Type:	Formula Variable
	Unit:	g
	Expression:	$(5*AW_C)+(7*AW_H)+(2*AW_O)+AW_N$
MW_CaCO3:	Description:	Peso molecular del CaCO3 (Carbonato de Calcio)
	Type:	Formula Variable
	Unit:	g
	Expression:	$40.078+(AW_C*1)+(AW_O*3)$
MW_CO2:	Description:	Peso molecular del CO2
	Type:	Formula Variable
	Unit:	g
	Expression:	$AW_C+(2*AW_O)$
MW_Glucose:	Description:	Peso molecular de la glucosa (C6H12O6)
	Type:	Formula Variable
	Unit:	g
	Expression:	$(6*AW_C)+(12*AW_H)+(6*AW_O)$
MW_HAC:	Description:	Peso molecular del Hac
	Type:	Formula Variable
	Unit:	g
	Expression:	$(AW_C*2)+(AW_H*4)+(AW_O*2)$
MW_HPr:	Description:	Peso molecular del HPr
	Type:	Formula Variable
	Unit:	g
	Expression:	$(AW_C*3)+(AW_H*6)+(AW_O*2)$
MW_NH3:	Description:	Peso molecular del NH3

	Type:	Formula Variable
	Unit:	g
	Expression:	$AW_N+(3*AW_H)$

MW_NH4:	Description:	Peso molecular del NH4
	Type:	Formula Variable
	Unit:	g
	Expression:	$AW_N+(4*AW_H)$

NH3mol:	Description:	Estequiometria de la Respiracion en dogena para todos los grupos de org anismos
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol
	Expression:	$(in_PscHon+4*in_PsChon-2*in_PschOn-23*in_PschoN)/(in_PscHon+4*in_PsChon-2*in_PschOn-3*in_PschoN)$

NT:	Description:	Concentracion de especies de nitrog eno total disuelto en el digestor
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$C2_NH3+C1_B10_NH4$

outALK:	Description:	HCO3 alcalinidad en el influente
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mg/l CaCO3
	Expression:	$(ALKmol*MW_CaCO3*1000)/2$

outALKmol:	Description:	H2CO3 en el influente
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	ALKmol

outCODbp:	Description:	DQObp convertida mgDQO/l
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mgDQO/l
	Expression:	$(D1_Sbp*(AW_C*in_PsChon+AW_H*in_PscHon+AW_O*in_PschOn+AW_N*in_PschoN))*1000*in_f_CODPS$

outCODbs:	Description:	conversion DQObs a mgDQO/l
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mgDQO/l
	Expression:	$D2_B2_Sbsf*MW_Glucose*1000*in_f_GlucCOD$

```

-----
outCODsol_H2S_HS:
  Description:      DQO de H2S/HS
  Type:            Formula Variable
  Unit:           mg DQO/l
  Expression:      (out_H2S+out_HS)*1.996
-----
outCODsol_organic:
  Description:      DQO total soluble en la salida
  Type:            Formula Variable
  Unit:           mgDQO/l
  Expression:      outCODbs+outCODus+outHAc_Ac+outHPr_
                  Pr
-----
outCODtot:        Description:      DQO total a la salida
                  Type:            Formula Variable
                  Unit:           mgDQO/l
                  Expression:      outCODtotpart+outCODtotsol
-----
outCODtotpart:   Description:      DQO total particulda
                  Type:            Formula Variable
                  Unit:           mgDQO/l
                  Expression:      outCODbp+outCODup+out_ZAC+out_ZAD+o
                  ut_ZAM+out_ZHM+xa_ps_out+xa_hs_out+
                  xa_as_out
-----
outCODtotsol:    Description:      DQO total soluble
                  Type:            Formula Variable
                  Unit:           mgDQO/l
                  Expression:      outCODbs+outCODus+outHAc_Ac+outHPr_
                  Pr+outCODsol_H2S_HS
-----
outCODup:        Description:      CODup conversion a mgDQO /l
                  Type:            Formula Variable
                  Unit:           mgDQO / l
                  Expression:      B3_CODup*1000
-----
outCODup_mol:    Description:      conversion CODup a mg DQO / l
                  Type:            Formula Variable
                  Unit:           mgDQO /l
                  Expression:      (((B3_CODup*1000)/in_f_CODPS)/1000)
                  / (AW_C*in_PschOn+AW_H*in_PschOn+AW_
                  O*in_PschOn+AW_N*in_PschOn)
-----
outCODus:        Description:      conversion de CODus a mg DQO / l
                  Type:            Formula Variable

```

	Unit:	mg DQO / l
	Expression:	B1_CODus*1000

outFSA:	Description:	total de amonio en el efluente con vertido mgN / l
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mg N / l
	Expression:	((C2_NH3*MW_NH3)+(C1_B10_NH4*MW_NH4)) *1000

outHAc_Ac:	Description:	total de acetato en el efluente con vertido
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mg DQO / l
	Expression:	(C13_HAc*MW_HAc*1000*in_f_HAcCOD)+(C14_AC*(MW_HAc-AW_H)*1000*in_f_HAcCOD)

outHPr_Pr:	Description:	total de propionato en el efluente convertido
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mg DQO / l
	Expression:	(C28_HPr*MW_HPr*1000*in_f_HPrCOD)+(C29_Pr*(MW_HPr-AW_H)*1000*in_f_HPrCOD)

out_CH4_volumen:	Description:	conversion mol / l CH4 a l / l influente
	Type:	Formula Variable
	Unit:	l / l influente
	Expression:	(P4_CH4*R*Tk_Gas)/pATM

out_CO2_volumen:	Description:	conversion de CO2 mol / l a l / l i nfluyente
	Type:	Formula Variable
	Unit:	l / l influente
	Expression:	(P1_C6_CO2gas*R*Tk_Gas)/pATM

out_Gas_PerMethane:	Description:	% gas metano
	Type:	Formula Variable
	Unit:	%
	Expression:	(out_CH4_volumen*100)/out_Gas_Volumen

```

-----
out_Gas_Volumen:
      Description:      volumen total de gas producido
      Type:             Formula Variable
      Unit:             l gas / l influente
      Expression:      out_CH4_volumen+out_CO2_volumen+out
                      _H2S_volumen
-----
out_H2S:
      Description:      concentracion en el efluente de H2S
      Type:             Formula Variable
      Unit:             mg /l
      Expression:      C32_H2S*1000*34.0818
-----
out_H2S_volumen:
      Description:      conversion mol / l de H2S a L / L
                      influente
      Type:             Formula Variable
      Unit:             l / l
      Expression:      (C33_H2Sgas*R*Tk_Gas)/pATM
-----
out_HS:
      Description:      concentracion HS en el efluente
      Type:             Formula Variable
      Unit:             mg / l
      Expression:      C34_HS*1000*33.0739
-----
out_HS04:
      Description:      concentracion de HSO4 en el efluent
                      e
      Type:             Formula Variable
      Unit:             mg/ l
      Expression:      C30_HSO4*1000*97.0705
-----
out_pH:
      Description:      pH para el efluente
      Type:             Formula Variable
      Unit:
      Expression:      pH
-----
out_SO4:
      Description:      Concentracion de efluente de SO4
      Type:             Formula Variable
      Unit:             mg/l
      Expression:      C31_SO4*1000*96.062
-----
out_ZAC:
      Description:      conversion de Z_AC a mg DQO / l
      Type:             Formula Variable
      Unit:             mg DQO / l
      Expression:      D5_Z_AC*MW_C5H7O2N*1000*f_C5H7O2NCO
                      D

```

```

-----
out_ZAD:      Description:      conversion de Z_AD a mg DQO / l
              Type:            Formula Variable
              Unit:            mg DQO / l
              Expression:      D4_Z_AD*MW_C5H7O2N*1000*f_C5H7O2NCO
                              D
-----
out_ZAM:      Description:      conversion de Z_AM a mg DQO / l
              Type:            Formula Variable
              Unit:            mg DQO / l
              Expression:      D6_Z_AM*MW_C5H7O2N*1000*f_C5H7O2NCO
                              D
-----
out_Zas:      Description:      conversion de Z_as a mg DQO / l
              Type:            Formula Variable
              Unit:            mg DQO / l
              Expression:      s2_Zas*MW_C5H7O2N*1000*f_C5H7O2NCOD
-----
out_ZHM:      Description:      conversion de Z_HM a mg DQO / l
              Type:            Formula Variable
              Unit:            mg DQO / l
              Expression:      D7_Z_HM*MW_C5H7O2N*1000*f_C5H7O2NCO
                              D
-----
out_Zhs:      Description:      conversion de Z_hs a mg DQO / l
              Type:            Formula Variable
              Unit:            mg DQO / l
              Expression:      s3_Zhs*MW_C5H7O2N*1000*f_C5H7O2NCOD
-----
out_Zps:      Description:      conversion de Z_ps a mg DQO / l
              Type:            Formula Variable
              Unit:            mg DQO / l
              Expression:      s1_Zps*MW_C5H7O2N*1000*f_C5H7O2NCOD
-----
P1_C6_CO2gas: Description:      concentracion del dioxido de carbon
                              o gaseoso
              Type:            Dyn. Volume State Var.
              Unit:            mol/l
              Relative Accuracy: 1e-006
              Absolute Accuracy: 1e-006
-----
P4_CH4:      Description:      concentracion de gas metano
              Type:            Dyn. Volume State Var.
              Unit:            mol/l
              Relative Accuracy: 1e-006
              Absolute Accuracy: 1e-006

```

pATM:	Description:	Presion Atmoferica al nivel del mar
	Type:	Formula Variable
	Unit:	atm
	Expression:	0.9869
pCO2:	Description:	Presion parcial de CO2
	Type:	Formula Variable
	Unit:	atm
	Expression:	$P1_C6_CO2gas / (P4_CH4 + P1_C6_CO2gas + C33_H2Sgas)$
pH:	Description:	Solucion de pH
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	$-\log_{10}(C7_H*fm)$
pH2S:	Description:	Presion Parcial de H2S (Sulfuro de Hidrogeno)
	Type:	Formula Variable
	Unit:	atm
	Expression:	$C33_H2Sgas / (P4_CH4 + P1_C6_CO2gas + C33_H2Sgas)$
pKa:	Description:	Constante de pK para Hac
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	$(1170.5/Tk) - 3.165 + (0.0134*Tk)$
pKc1:	Description:	Constante de pK para H2CO3 (Acido Carbonico)
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	$(3404.7/Tk) - 14.8435 + (0.03279*Tk)$
pKc2:	Description:	Constante de pK para HCO3 (Bicarbonato)
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	$(2902.4/Tk) - 6.498 + (0.02379*Tk)$
pKH:	Description:	Constante de pK Hidrogeno
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	8

pKH2S:	Description:	Constante de pk para H2S (Acido Sulfurico)
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	$7 + (1132.18/Tk) - 3.7993$

pKHC02:	Description:	Constante de pK para la disolucion de CO2
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	$-(2025.3/Tk) - (0.0104*Tk) + 11.365$

pKHSO4:	Description:	Constante de pK para HSO4 (Acido Sulfurico)
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	1.99

pKn:	Description:	Constante de pk para NH4 (amonio)
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	$(2835.8/Tk) - 0.6322 + (0.00123*Tk)$

pKp1:	Description:	Constante de pK para H3PO4 (Acido Fosforico)
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	$(799.3/Tk) - 4.5535 + (0.01349*Tk)$

pKp2:	Description:	Constante de pk para H2PO4
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	$(1979.5/Tk) - 5.3541 + (0.01984*Tk)$

pKp3:	Description:	Constante de pK para HPO4
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	12.023

pKPr:	Description:	Constante de pK para HPr
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	$(1170.5/Tk) - 3.165 + (0.0134*Tk)$

pKW:	Description:	Constante de pK para disociacion de l agua

	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	14

Pr_init:	Description:	concentracion inicial de Pr en el reactor
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$(PT_init * Kp) / (vinit_H + Kp)$

PT_init:	Description:	concentracion inicial de propionato en el reactor anaerobio
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mol/l
	Value:	0.029
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

Qi:	Description:	flujo del influente
	Type:	Formula Variable
	Unit:	l / d
	Expression:	Vr / Rs

Qin:	Description:	flujo del influente para H
	Type:	Formula Variable
	Unit:	l / d
	Expression:	0.001

R:	Description:	constante universal de los gases
	Type:	Constant Variable
	Unit:	l. atm /K.mol
	Value:	0.0820575
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

Rs:	Description:	tiempo de retencion en el reactor
	Type:	Constant Variable
	Unit:	d
	Value:	10
	Standard Deviation:	1

	Minimum:	0
	Maximum:	70
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

s1_Zps:	Description:	concentracion de biomasa del propio nato degradado SRB
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	mol/l
	Relative Accuracy:	1e-006
	Absolute Accuracy:	1e-006

s2_Zas:	Description:	concentracion de la biomasa acetotrofica
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	mol/l
	Relative Accuracy:	1e-006
	Absolute Accuracy:	1e-006

s3_Zhs:	Description:	concentracion de la biomasa hidrogenotrofica SRB
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	mol/l
	Relative Accuracy:	1e-006
	Absolute Accuracy:	1e-006

Sbp:	Description:	estequiometria para la respiracion endogena para todos los grupos de microorganismos
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol
	Expression:	$20 / (in_PscHon + 4 * in_PsChon - 2 * in_PschOn - 3 * in_PschoN)$

SC:	Description:	Conductividad Especifica
	Type:	Formula Variable
	Unit:	ms/m
	Expression:	inSC

SO4_in:	Description:	influyente SO4
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$(KHSO4 * (sulphateT_in / 1000 / MWSO4)) / (inH + KHSO4)$

SO4_init:	Description:	concentracion inicial de SO4 en el

	Type:	reactor
	Unit:	mol/l
	Expression:	(sulphate_T_init*KHSO4)/(vinit_H+KHSO4)

St:	Description:	especies total de sulfato
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	C32_H2S+C34_HS

sulphateT_in:	Description:	total de especies del sulfato en e influyente
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mgSO4/l
	Value:	2000
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	100000
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

sulphate_T_init:	Description:	concentracion inicial de sSulfato e n el reactor
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mol SO4/l
	Value:	48
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	100
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

sulphideT_in:	Description:	total de especie de sulfito en el influyente
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mgS/l
	Value:	1
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	100
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

sulphideT_init:	Description:	concentracion inicial de sulfito en

		el reactor
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mols/l
	Value:	0.01
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	100
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

Tc:	Description:	temperatura en grados celcius
	Type:	Constant Variable
	Unit:	deg. C
	Value:	35
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	50
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

Tc_Gas:	Description:	temperatura ambiente del gas
	Type:	Constant Variable
	Unit:	deg. celcius
	Value:	20
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	100
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

Tk:	Description:	Conversion de Temperatura de Celsius a Kelvin
	Type:	Formula Variable
	Unit:	deg. k
	Expression:	Tc+273.15

Tk_Gas:	Description:	conversion de temperatura de celsius a kelvon
	Type:	Formula Variable
	Unit:	deg K
	Expression:	Tc_Gas+273.15

vinit_Ac:	Description:	concentracion inicial de especies A c en el reactor
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l

	Expression:	$(vinit_AT * Ka) / (vinit_H + Ka)$
vinit_ALK:	Description:	alcalinidad inicial en el reactor
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mg/l con CaCO3
	Expression:	$(vinit_ALKmol * MW_CaCO3 * 1000) / 2$
vinit_ALKmol:	Description:	alcalinidad inicial en el reactor
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$(2 * vinit_CO3) + vinit_HCO3 + vinit_OH - vinit_H$
vinit_AT:	Description:	total de especies en el inicio
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mol/l
	Value:	0.029
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive
vinit_CH4:	Description:	concentracion inicial del metano
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mol/l
	Value:	0.22
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive
vinit_CO2gas:	Description:	valor inicial del CO2 gas
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mol/l
	Value:	0.2333
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive
vinit_CO3:	Description:	concentracion inicial de especies de CO3 en el reactor
	Type:	Formula Variable

	Unit:	mol/l
	Expression:	$vinit_CT / (((vinit_H^2) / (Kc1 * Kc2)) + (vinit_H / Kc2) + 1)$

vinit_CODbp:	Description:	concentracion inicial de DQObp de e species en el reactor
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	inSbpi_mol

vinit_CODbs:	Description:	concentracion inicial de la glucosa en el reactor
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mol/l
	Value:	0.1237
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

vinit_CT:	Description:	especies iniciales de carbon total disuelto
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mol/l
	Value:	0.0133
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

vinit_H:	Description:	concentracion de especies iniciales de H
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$(10^{(-vinit_pH)}) / fm$

vinit_H2:	Description:	concentracion inicial de H2 en el r eactor anaerobio
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mol/l
	Value:	0.01
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10

	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

vinit_H2CO3:	Description:	concentraicion inicial de especies H2CO3 en el reactor
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$vinit_CT / (1 + (Kc1/vinit_H) + ((Kc1 * Kc2) / (vinit_H^2)))$

vinit_H2Sgas:	Description:	valor inicial del H2S gas
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mol /l
	Value:	0.2333
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

vinit_HAc:	Description:	concentracion inicial de HAc en el reactor
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$(vinit_AT^{vinit_H}) / (vinit_H + Ka)$

vinit_HCO3:	Description:	Concentracion inicial de especies HCO3 en el reactor
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$vinit_CT / ((vinit_H / Kc1) + 1 + (Kc2 / vinit_H))$

vinit_NH3:	Description:	concentracion inicial de especies NH3 en el reactor
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$(vinit_NT * Kn) / (vinit_H + Kn)$

vinit_NH4:	Description:	concentracion inicial de especies de NH4 en el reactor
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$(vinit_NT * vinit_H) / (vinit_H + Kn)$

vinit_NT:	Description:	especie inicial de nitrigeno total

	Type:	disuelto Constant Variable
	Unit:	mol/l
	Value:	0.0109
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

vinit_OH:	Description:	concentracion inicial de especies OH
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mol/l
	Expression:	$(10^{-(14-vinit_pH)})/fm$

vinit_pH:	Description:	pH inicial en el digestor
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	inpH

vinit_ZAC:	Description:	concentracion inicial acetogenica en el reactor anaerobio
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mol/l
	Value:	0.0001778
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

vinit_ZAD:	Description:	concentracion inicial acidogenica en el reactor anaerobio
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mol/l
	Value:	0.008317
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

vinit_ZAM:	Description:	concentracion inicial de la metanogenesis Acetoclastica en el reactor
	Type:	Constant Variable

	Unit:	mol/l
	Value:	0.0007956
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

vinit_ZHM:	Description:	Concentracion inicial metanogenesis Hydrogenotrofica en el reactor
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mol/l
	Value:	0.0003067
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

Vr:	Description:	Volumen del Reactor
	Type:	Constant Variable
	Unit:	l
	Value:	16
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	1000
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

xa_as_init:	Description:	concentracion inicial acetotrofico SRB en el reactor anaerobio
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mol/l
	Value:	0.0004012
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

xa_as_out:	Description:	xa_as conersion a mg DQO
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mg DQO/l
	Expression:	s2_Zas*MW_C5H7O2N*1000*f_C5H7O2NCOD

xa_hs_init:	Description:	concentracion inicial Hidrogenotrof
-------------	--------------	-------------------------------------

	Type:	ica SRB en el reactor
	Unit:	Constant Variable
	Value:	mol/l
	Standard Deviation:	0.0005193
	Minimum:	1
	Maximum:	0
	Sensitivity Analysis:	10
	Parameter Estimation:	inactive

xa_hs_out:	Description:	xa_hs conversion a mg DQO/l
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mg DQO/l
	Expression:	s3_Zhs*MW_C5H7O2N*1000*f_C5H7O2NCOD

xa_ps_init:	Description:	concentracion inicial del propionat o degradado SRB en el reactor anaer obio
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mol/l
	Value:	0.0003067
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

xa_ps_out:	Description:	conversion de xa_ps a mg DQO/l
	Type:	Formula Variable
	Unit:	mg DQO/l
	Expression:	s1_Zps*MW_C5H7O2N*1000*f_C5H7O2NCOD

Y_AC:	Description:	coeficiente de rendimiento acetogen ico
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mol organismos / mol sustrato
	Value:	0.0278
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

Y_AD:	Description:	coeficiente de rendimiento acidogen ico
	Type:	Constant Variable

	Unit:	mol organismo / mol sustrato
	Value:	0.1074
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

Y_AM:	Description:	coeficiente de rendimiento de la metanogenesis acetoclastica
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mol organismo / mol sustrato
	Value:	0.0157
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

Y_as:	Description:	coeficiente de rendimiento acetotrofico SRB
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mol org / mol sustrato
	Value:	0.0188
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

Y_HM:	Description:	coeficiente de rendimiento de la metanogenesis hidrogenotrofica
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mol org / mol sustrato
	Value:	0.004
	Standard Deviation:	1
	Minimum:	0
	Maximum:	10
	Sensitivity Analysis:	inactive
	Parameter Estimation:	inactive

Y_hs:	Description:	coeficiente de rendimiento Hidrogenotrofico SRB
	Type:	Constant Variable
	Unit:	mol org / mol sustrato
	Value:	0.0070719

```

Standard Deviation: 1
Minimum: 0
Maximum: 10
Sensitivity Analysis: inactive
Parameter Estimation: inactive
-----
Y_ps:      Description:      coeficiente de rendimiento del prop
          ionato degradado SRB
          Type:      Constant Variable
          Unit:      mol organismos / mol sustrato
          Value:      0.02688
          Standard Deviation: 1
          Minimum: 0
          Maximum: 10
          Sensitivity Analysis: inactive
          Parameter Estimation: inactive
*****

*****
Processes
*****
c10_RevDissH3PO4:
  Description:      Disosiacion Inversa para Fosforico
  Type:      Dynamic Process
  Rate:      Krp1*C10_H2PO4*C7_H
  Stoichiometry:
    Variable : Stoichiometric Coefficient
    C9_H3PO4 : 1
    C10_H2PO4 : -1
    C7_H : -1
-----
c11_ForDissH2PO4:
  Description:      Avance de disociacion de H2PO4
  Type:      Dynamic Process
  Rate:      kfp2*C10_H2PO4
  Stoichiometry:
    Variable : Stoichiometric Coefficient
    C10_H2PO4 : -1
    C11_HPO4 : 1
    C7_H : 1
-----
c12_RevDissH2PO4:

```

Description: disociacion inversa de H2PO4
Type: Dynamic Process
Rate: $Krp2 * C11_HPO4 * C7_H$
Stoichiometry:
Variable : Stoichiometric Coefficient
C10_H2PO4 : 1
C11_HPO4 : -1
C7_H : -1

c13_ForDissHPO4:
Description: Disociacion de avance para HPO4
Type: Dynamic Process
Rate: $kfp3 * C11_HPO4$
Stoichiometry:
Variable : Stoichiometric Coefficient
C11_HPO4 : -1
C12_PO4 : 1
C7_H : 1

c14_RevDissHPO4:
Description: Disociacion Inversa paraHPO4
Type: Dynamic Process
Rate: $Krp3 * C12_PO4 * C7_H$
Stoichiometry:
Variable : Stoichiometric Coefficient
C11_HPO4 : 1
C12_PO4 : -1
C7_H : -1

c15_ForDissHAc:Description: Disociacion de Avance del Acido Ace
tico
Type: Dynamic Process
Rate: $Kfa * C13_HAc$
Stoichiometry:
Variable : Stoichiometric Coefficient
C7_H : 1
C13_HAc : -1
C14_AC : 1

c16_RevDissHAc:Description: Disociacion inversa del Acido Aceti
co
Type: Dynamic Process
Rate: $Kra * C14_AC * C7_H$
Stoichiometry:
Variable : Stoichiometric Coefficient
C7_H : -1

```

C13_HAc : 1
C14_AC : -1
-----
c17_ForDissH2o:Description:      Disociacion de Avance para el agua
Type:                            Dynamic Process
Rate:                             kfw
Stoichiometry:
  Variable : Stoichiometric Coefficient
  C7_H : 1
  C8_OH : 1
-----
c18_RevDissH2O:Description:      Disociacion ivnversa del Agua
Type:                            Dynamic Process
Rate:                             Krw*C7_H*C8_OH
Stoichiometry:
  Variable : Stoichiometric Coefficient
  C7_H : -1
  C8_OH : -1
-----
c1_ForDissNH4: Description:      Disociacion avanzada del amonio
Type:                            Dynamic Process
Rate:                             kfn*C1_B10_NH4
Stoichiometry:
  Variable : Stoichiometric Coefficient
  C1_B10_NH4 : -1
  C2_NH3 : 1
  C7_H : 1
-----
c2_RevDissNH4: Description:      Disociacion Inversa del amonio
Type:                            Dynamic Process
Rate:                             Krn*C2_NH3*C7_H
Stoichiometry:
  Variable : Stoichiometric Coefficient
  C1_B10_NH4 : 1
  C2_NH3 : -1
  C7_H : -1
-----
c3_ForDissH2CO3:
Description:                       Disociacion de avance para el acid
                                  o carbonico disuelto en CO2
Type:                             Dynamic Process
Rate:                             kfc1*C3_H2CO3
Stoichiometry:
  Variable : Stoichiometric Coefficient
  C3_H2CO3 : -1
  C4_HCO3 : 1

```

```

C7_H : 1
-----
c46_ForDissHPr:Description:      Disociacion de avance para acido Pr
                                opionico
Type:                            Dynamic Process
Rate:                            kfpr*C28_HPr
Stoichiometry:
  Variable : Stoichiometric Coefficient
  C28_HPr : -1
  C7_H : 1
  C29_Pr : 1
-----
c47_RevDissHPr:Description:      disociacion inversa para acido Prop
                                ionico
Type:                            Dynamic Process
Rate:                            KrPr*C29_Pr*C7_H
Stoichiometry:
  Variable : Stoichiometric Coefficient
  C28_HPr : 1
  C7_H : -1
  C29_Pr : -1
-----
c48_forwdissHSO4:
Description:                      Disociacion de Avance para HSO4
Type:                            Dynamic Process
Rate:                            kfHSO4*C30_HSO4
Stoichiometry:
  Variable : Stoichiometric Coefficient
  C7_H : 1
  C30_HSO4 : -1
  C31_SO4 : 1
-----
c49revdissHSO4:Description:      Disociacion Inversa para HSO4
Type:                            Dynamic Process
Rate:                            KrHSO4*C7_H*C31_SO4
Stoichiometry:
  Variable : Stoichiometric Coefficient
  C7_H : -1
  C30_HSO4 : 1
  C31_SO4 : -1
-----
c4_RevDissH2CO3:
Description:                      Disociacion inversa para acido Carb
                                onico disuelto en CO2
Type:                            Dynamic Process
Rate:                            Krcl*C4_HCO3*C7_H

```

```

Stoichiometry:
  Variable : Stoichiometric Coefficient
  C3_H2CO3 : 1
  C4_HCO3 : -1
  C7_H : -1
-----
c50forwdissH2S:Description:      disociacion de avance para H2S
  Type:                          Dynamic Process
  Rate:                          kfH2S*C32_H2S
  Stoichiometry:
    Variable : Stoichiometric Coefficient
    C7_H : 1
    C32_H2S : -1
    C34_HS : 1
-----
c51revdissH2S: Description:      Disociacion inversa para H2S
  Type:                          Dynamic Process
  Rate:                          KrH2S*C34_HS*C7_H
  Stoichiometry:
    Variable : Stoichiometric Coefficient
    C7_H : -1
    C32_H2S : 1
    C34_HS : -1
-----
c5_ForDissHCO3:Description:      Disociacion de avance para el ion
                                Bicarbonato
  Type:                          Dynamic Process
  Rate:                          kfc2*C4_HCO3
  Stoichiometry:
    Variable : Stoichiometric Coefficient
    C4_HCO3 : -1
    C5_CO3 : 1
    C7_H : 1
-----
c6_RevDissHCO3:Description:      disociacion inversa para ion bicarb
                                onato
  Type:                          Dynamic Process
  Rate:                          Krc2*C5_CO3*C7_H
  Stoichiometry:
    Variable : Stoichiometric Coefficient
    C4_HCO3 : 1
    C5_CO3 : -1
    C7_H : -1
-----
c9_ForDissH3PO4:
  Description:                    disociacion de avance para Acido Fo

```

```

sforico
Type:          Dynamic Process
Rate:         kfp1*C9_H3PO4
Stoichiometry:
  Variable : Stoichiometric Coefficient
  C9_H3PO4 : -1
  C10_H2PO4 : 1
  C7_H : 1
-----
D10_EndRespHydrogenotrophicMetanogens:
Description:   muerte de las bacterias metanogenic
              as Hydrogenotroficas
Type:         Dynamic Process
Rate:        b_HM*D7_Z_HM
Stoichiometry:
  Variable : Stoichiometric Coefficient
  D7_Z_HM : -1
  C3_H2CO3 : (5*(in_PscHon-2*in_PschOn-3*in_PschoN))/Hydr
              olysisProt
  C2_NH3 : (in_PscHon+4*in_PsChon-2*in_PschOn-23*in_Pscho
              N)/HydrolysisProt
  D1_Sbp : 20/HydrolysisProt
-----
D1_Hydrolysis: Description:   conversion de DQObp a DQObs (glucos
                              a)
Type:         Dynamic Process
Rate:        ((Kmax_Hyd*(D1_Sbp/D4_Z_AD))/(Ks_Hy
              d+(D1_Sbp/D4_Z_AD)))*D4_Z_AD
Stoichiometry:
  Variable : Stoichiometric Coefficient
  D1_Sbp : -1
  C3_H2CO3 : -((in_PscHon-2*in_PschOn-3*in_PschoN)/4)
  D2_B2_Sbsf : HydrolysisProt/24
  C2_NH3 : in_PschoN
-----
D2_Acidogenesis_lowpH2:
Description:   Acidogenesis bajo- alto Presion par
              cial de Hidrogeno
Type:         Dynamic Process
Rate:        ((muMAX_AD*D2_B2_Sbsf)/(Ks_AD+D2_B2
              _Sbsf))*(1-(D3_H2/(KH2+D3_H2)))*D4_
              Z_AD
Stoichiometry:
  Variable : Stoichiometric Coefficient
  D2_B2_Sbsf : -1/Y_AD
  C13_HAc : (2*(1-((5*Y_AD)/6)))/Y_AD

```

```

D3_H2 : (4*(1-((5*Y_AD)/6)))/Y_AD
C3_H2CO3 : (2*(1-((5*Y_AD)/6)))/Y_AD
C1_B10_NH4 : -1
C7_H : 1
D4_Z_AD : 1

```

D3_Acidogenesis_highpH2:

```

Description:      Acidogenesis alta presion paricial
                  de Hidrogeno
Type:            Dynamic Process
Rate:           ((muMAX_AD*D2_B2_Sbsf)/(Ks_AD+D2_B2
                  _Sbsf))* (D3_H2/(KH2+D3_H2))*D4_Z_AD

Stoichiometry:
Variable : Stoichiometric Coefficient
D2_B2_Sbsf : -(1/Y_AD)
C13_HAc : (1-((5*Y_AD)/6))/Y_AD
D3_H2 : (1-((5*Y_AD)/6))/Y_AD
C28_HPr : (1-((5*Y_AD)/6))/Y_AD
C1_B10_NH4 : -1
C7_H : 1
D4_Z_AD : 1
C3_H2CO3 : (1-((5*Y_AD)/6))/Y_AD

```

D4_EndRespAcidogens:

```

Description:      Muerte de bacterias Acidogenicas
Type:            Dynamic Process
Rate:           b_AD*D4_Z_AD

Stoichiometry:
Variable : Stoichiometric Coefficient
D4_Z_AD : -1
C3_H2CO3 : (5*(in_PscHon-2*in_PschOn-3*in_PschoN))/Hydr
            olysisProt
C2_NH3 : (in_PscHon+4*in_PsChon-2*in_PschOn-23*in_Pscho
            N)/HydrolysisProt
D1_Sbp : 20/HydrolysisProt

```

D5_Acetogenesis:

```

Description:
Type:            Dynamic Process
Rate:           ((muMAX_AC*C29_Pr)/(Ks_AC+C29_Pr))*
                  (1-(D3_H2/(KH2+D3_H2)))*D5_Z_AC

Stoichiometry:
Variable : Stoichiometric Coefficient
C28_HPr : -(1/Y_AC)
C13_HAc : (1-((3*Y_AC)/2))/Y_AC
D3_H2 : (3-4*Y_AC)/Y_AC

```

```

C1_B10_NH4 : -1
D5_Z_AC : 1
C7_H : 1
C3_H2CO3 : (1-2*Y_AC)/Y_AC

```

D6_EndRespAcetogens:

```

Description:      muerte de bacterias acetogenica
Type:            Dynamic Process
Rate:           b_AC*D5_Z_AC
Stoichiometry:
Variable : Stoichiometric Coefficient
D5_Z_AC : -1
C3_H2CO3 : (5*(in_PscHon-2*in_PschOn-3*in_PschoN))/Hydr
olysisProt
C2_NH3 : (in_PscHon+4*in_PsChon-2*in_PschOn-23*in_Pscho
N)/HydrolysisProt
D1_Sbp : 20/HydrolysisProt

```

D7_AcetoclassticMetanogenesis:

```

Description:
Type:            Dynamic Process
Rate:           ((muMAX_AM*C13_HAc)/(Ks_AM+C13_HAc)
)*D6_Z_AM
Stoichiometry:
Variable : Stoichiometric Coefficient
C13_HAc : -(1/Y_AM)
C3_H2CO3 : (1-((5*Y_AM)/2))/Y_AM
C1_B10_NH4 : -1
C7_H : 1
D6_Z_AM : 1
P4_CH4 : (1-((5*Y_AM)/2))/Y_AM

```

D8_EndRespAcetoclasticMethanogens:

```

Description:      Muerte de las Bacterias Metanogenic
as Acetoclasticas
Type:            Dynamic Process
Rate:           b_AM*D6_Z_AM
Stoichiometry:
Variable : Stoichiometric Coefficient
D6_Z_AM : -1
C3_H2CO3 : (5*(in_PscHon-2*in_PschOn-3*in_PschoN))/Hydr
olysisProt
C2_NH3 : (in_PscHon+4*in_PsChon-2*in_PschOn-23*in_Pscho
N)/HydrolysisProt
D1_Sbp : 20/HydrolysisProt

```

D9_HydrogenotrophicMethanogenesis:

Description:

Type: Dynamic Process

Rate: $((\mu_{\text{Max_HM}} \cdot D_{3_H2}) / (K_{s_HM} + D_{3_H2})) \cdot D_{7_Z_HM}$

Stoichiometry:

Variable : Stoichiometric Coefficient

D3_H2 : $-(1/Y_{HM})$ C3_H2CO3 : $-((1+10 \cdot Y_{HM}) / (4 \cdot Y_{HM}))$

C1_B10_NH4 : -1

C7_H : 1

D7_Z_HM : 1

P4_CH4 : $((1-10 \cdot Y_{HM}) / (4 \cdot Y_{HM}))$ -----
p12_DissolutionH2S:

Description: Disolucion Gaseosa de H2S

Type: Dynamic Process

Rate: $K_{rH2Sgas} \cdot p_{H2S} \cdot K_{H2Sgas}$

Stoichiometry:

Variable : Stoichiometric Coefficient

C32_H2S : 1

C33_H2Sgas : -1

p13_ExpulsionH2S:

Description: Expulsion Disuelto de H2S

Type: Dynamic Process

Rate: $K_{rH2Sgas} \cdot C_{32_H2S}$

Stoichiometry:

Variable : Stoichiometric Coefficient

C32_H2S : -1

C33_H2Sgas : 1

p6_C7_DissolutionCO2:

Description: Disolucion del gas de CO2

Type: Dynamic Process

Rate: $K_{rCO2} \cdot p_{CO2} \cdot K_{HCO2}$

Stoichiometry:

Variable : Stoichiometric Coefficient

C3_H2CO3 : 1

P1_C6_CO2gas : -1

p7_C8_ExpulsionCO2:

Description: Expulsion de Dioxido de Carbono Disuelto

Type: Dynamic Process

Rate: $K_{rCO2} \cdot C_{3_H2CO3}$

```

Stoichiometry:
  Variable : Stoichiometric Coefficient
  C3_H2CO3 : -1
  P1_C6_CO2gas : 1
-----
s1_Zps_Decay: Description:          Decaimmient o degradado
              Type:                Dynamic Process
              Rate:                 bps*s1_Zps
              Stoichiometry:
                Variable : Stoichiometric Coefficient
                C2_NH3   : NH3mol
                C3_H2CO3 : H2CO3mol
                D1_Sbp   : Sbp
                s1_Zps   : -1
-----
s2_Zps_growth: Description:        Crecimiento del Propionato degradad
              Type:                Dynamic Process
              Rate:                 ((muMAX_ps*C28_HPr)/((KSmol_ps*(C28_HPr/(C28_HPr+C29_Pr))+C28_HPr))*(C31_SO4/(KNmol_ps+C31_SO4))*(C1_B10_NH4/(K_NH4+C1_B10_NH4))*s1_Zps
              Stoichiometry:
                Variable : Stoichiometric Coefficient
                C1_B10_NH4 : -1
                C3_H2CO3  : ((1/Y_ps)-2)
                C7_H      : (13/4-(3/(2*Y_ps)))
                C13_HAc   : ((1/Y_ps)-3/2)
                C28_HPr   : -(1/Y_ps)
                D3_H2     : 1/2
                C31_SO4   : -((3/(4*Y_ps))-9/8)
                C32_H2S   : ((3/(4*Y_ps))-9/8)
                s1_Zps    : 1
-----
s3_Zas_Growth: Description:
              Type:                Dynamic Process
              Rate:                 ((muMAX_as*C13_HAc)/((KSmol_as*(C13_HAc/(C13_HAc+C14_AC))+C13_HAc))*(C31_SO4/(KNmol_as+C31_SO4))*(C1_B10_NH4/(K_NH4+C1_B10_NH4))*s2_Zas
              Stoichiometry:
                Variable : Stoichiometric Coefficient
                C1_B10_NH4 : -1
                C3_H2CO3  : ((2/(Y_as))-5)
                C7_H      : (6-(2/(Y_as)))

```

```

C13_HAc : -(1/Y_as)
C31_SO4 : -((1/(Y_as))-5/2)
C32_H2S : ((1/(Y_as))-5/2)
s2_Zas : 1

```

```

-----
s4_Zas_decay: Description:      Decaimiento endogeno acetotrofico
Type:          Dynamic Process
Rate:          bas*s2_Zas
Stoichiometry:
Variable : Stoichiometric Coefficient
C2_NH3 : NH3mol
D1_Sbp : Sbp
C3_H2CO3 : H2CO3mol
s2_Zas : -1

```

```

-----
s5_Zhs_growth: Description:      crecimiento Hidrogenotrofico SRB
Type:          Dynamic Process
Rate:          ((muMAX_hs*D3_H2)/(KSmol_hs+D3_H2))
               *(C31_SO4/(KNmol_hs+C31_SO4))*(C1_B
               10_NH4/(K_NH4+C1_B10_NH4))*s3_Zhs
Stoichiometry:
Variable : Stoichiometric Coefficient
C1_B10_NH4 : -1
C3_H2CO3 : -5
C7_H : (6-(1/(2*Y_hs)))
D3_H2 : -(1/Y_hs)
C31_SO4 : -((1/(4*Y_hs))-5/2)
C32_H2S : ((1/(4*Y_hs))-5/2)
s3_Zhs : 1

```

```

-----
s6_Zhs_decay: Description:      decaimiento endogeno Hidrogenotrofi
co
Type:          Dynamic Process
Rate:          bhs*s3_Zhs
Stoichiometry:
Variable : Stoichiometric Coefficient
C2_NH3 : NH3mol
C3_H2CO3 : H2CO3mol
D1_Sbp : Sbp
s3_Zhs : -1

```

```

*****

```

 Compartments

Reactor: Description:
 Type: Mixed Reactor Compartment
 Compartment Index: 0
 Active Variables: C14_AC, ALK, ALKmol, AW_C, AW_H, AW_N, AW_O, AW_P, AW_S, b_AD, b_AC, b_as, bhs, bps, B1_CODus, b_AM, B3_CO Dup, b_HM, C10_H2PO4, C11_HPO4, P4_CH4, P1_C6_CO2gas, C5_CO3, D1_Sbp, D2_B2_Sbsf, CT, EndogenousProt, C30_HSO4, C12_PO4, C31_SO4, C33_H2Sgas, C32_H2S, fd, C34_HS, C13_HAc, fm, C1_B10_NH4, C29_Pr, ft, C28_HPr, C9_H3PO4, f_C5H7O2NCOD, C2_NH3, C7_H, D3_H2, C3_H2CO3, C4_HCO3, Kmax_Hyd, HydrolysisProt, inALK, inALKmol, C8_OH, inCO3, inCO3acidity, H2CO3mol, H2S_in, HPr_init, H2S_init, H2_in, HSO4_in, HSO4_init, HS_in, HS_init, inCT, D4_Z_AD, inNai, D6_Z_AM, D7_Z_HM, D5_Z_AC, inH, inH2CO3, inHCO3, inNH3, inNH4, inOH, inSbpi, inSpi, inSupi, inSbpi_mol, inSbsaAac_mol, inSbsaAHAc_mol, inSbsfi, inSbsaAi_mol, inSbsaAi, inSbsaPHPr_mol, inSbsaPi, inSbsaPi_mol, inSbsaPPr_mol, inSsi, inSbsai, inSusi, inSti, inSC, in_f_GlucCOD, in_f_HAc, in_f_H2COD, in_f_CODPS, in_f_HAcCOD, in_f_HPr, in_f_HPrCOD, in_f_sup, in_f_Sus, inpH, Kc1, Kc2, Kfa, kfcl, kfc2, kfn, Ka, kfp1, kfp2, kfp3, kfpr, kfw, kfH2S, kfHSO4, KHCO2, Kn, Kra, Krc1, Krc2, KH2Sgas, KrCO2, KH2, KH2S, Krn, Krp1, KHSO4, KImol_as, KImol_hs, KImol_ps, KI_as, KI_hs, KI_ps, Krp2, Krp3, KNmol_as, KNH4, KNmol_hs, KNmol_ps, KN_as, KN_hs, KN_ps, Kp, KrH2Sgas, KrPr, Krw, Ks_AD, Ks_AC, KrH2S, Ks_AM, KrHSO4, Ks_HM, Ks_Hyd, Kw, muMAX_AD, muMAX_AC, muMAX_AM, KSmol_as, KSmol_hs, KSmol_ps, muMax_HM, in_PsChon, in_PschOn, KS_as, in_PschOn, KS_hs, MW_C5H7

O2N, in_PschoN, MW_CaCO3, MW_CO2, MW_Glucose, MW_HAC, MW_HPr, muMAX_as, MW_NH3, MWS, MWSO4, muMAX_hs, muMAX_ps, MWH2, MWH2S, NT, MWHSO4, out_Gas_PerMethane, outALK, outALKmol, outCODbp, outCODbs, outCODtot, outCODtotpart, outCODtotsol, outCODup, outCODus, outFSA, NH3mol, outHAc_Ac, outHPr_Pr, out_ZAC, out_ZAD, out_ZAM, out_ZHM, out_pH, pCO2, pH, pKa, pKc1, pKc2, pKHCO2, pKn, out_H2S_volumen, pKp1, pKp2, out_CH4_volumen, out_SO4, out_Gas_Volumen, out_CO2_volumen, pKp3, pKPr, pKW, Qi, R, Rs, SC, Tc, Tk, vinit_ALK, pH2S, vinit_ALKmol, vinit_CO3, vinit_CODbs, vinit_CT, pATM, vinit_H, vinit_H2CO3, vinit_HCO3, vinit_Ac, vinit_NH4, vinit_NT, vinit_OH, pKH2S, Pr_init, PT_init, vinit_pH, pKHSO4, vinit_ZAC, vinit_ZAD, vinit_ZAM, vinit_ZHM, Vr, Y_AD, Y_AC, Y_AM, Y_HM, s1_Zps, s2_Zas, s3_Zhs, Sbp, SO4_in, SO4_init, St, sulphateT_in, sulphateT_init, sulphideT_in, sulphideT_init, Tc_Gas, Tk_Gas, vinit_AT, vinit_CH4, vinit_CO2gas, vinit_CODbp, vinit_H2, vinit_HAc, vinit_NH3, xa_as_init, xa_as_out, vinit_H2Sgas, xa_hs_init, xa_hs_out, xa_ps_init, xa_ps_out, Y_as, Y_hs, Y_ps

Active Processes:

c10_RevDissH3PO4, c11_ForDissH2PO4, p6_C7_DissolutionCO2, c13_ForDissHPO4, p7_C8_ExpulsionCO2, c12_RevDissH2PO4, c14_RevDissHPO4, c3_ForDissH2CO3, c17_ForDissH2o, c16_RevDissHAc, c15_ForDissHAc, c5_ForDissHCO3, c2_RevDissNH4, c46_ForDissHPr, c48_forwdissHSO4, c49revdissHSO4, c1_ForDissNH4, c50forwdissH2S, c18_RevDissH2O, c47_RevDissHPr, c4_RevDissH2CO3, c9_ForDissH3PO4, c51revdissH2S, c6_RevDissHCO3, D7_AcetoclasticMetanogenesis, D5_Acetogenesis, D3_Acidogenesis_highpH2, D2_Acidogenesis_lowpH2, D8_EndRespAcetoclasticMe

```

thanogens, D10_EndRespHydrogenotrop
hicMetanogens, D1_Hydrolysis, D6_En
dRespAcetogens, p12_DissolutionH2S,
p13_ExpulsionH2S, D4_EndRespAcidog
ens, D9_HydrogenotrophicMethanogene
sis, s1_Zps_Decay, s3_Zas_Growth, s
4_Zas_decay, s2_Zps_growth, s5_Zhs_
growth, s6_Zhs_decay

```

Initial Conditions:

```

Variable(Zone) : Initial Condition
C7_H(Bulk Volume) : vinit_H
C8_OH(Bulk Volume) : vinit_OH
D4_Z_AD(Bulk Volume) : vinit_ZAD
D5_Z_AC(Bulk Volume) : vinit_ZAC
C33_H2Sgas(Bulk Volume) : vinit_H2Sgas
C29_Pr(Bulk Volume) : Pr_init
D6_Z_AM(Bulk Volume) : vinit_ZAM
C28_HPr(Bulk Volume) : HPr_init
D7_Z_HM(Bulk Volume) : vinit_ZHM
C3_H2CO3(Bulk Volume) : vinit_H2CO3
C4_HCO3(Bulk Volume) : vinit_HCO3
C5_CO3(Bulk Volume) : vinit_CO3
D2_B2_Sbsf(Bulk Volume) : vinit_CODbs
C2_NH3(Bulk Volume) : vinit_Ac
C1_B10_NH4(Bulk Volume) : vinit_CH4
P4_CH4(Bulk Volume) : vinit_CH4
P1_C6_CO2gas(Bulk Volume) : vinit_CO2gas
C14_AC(Bulk Volume) : vinit_Ac
C13_HAc(Bulk Volume) : vinit_HAc
D1_Sbp(Bulk Volume) : vinit_CODbp
D3_H2(Bulk Volume) : vinit_H2
C31_SO4(Bulk Volume) : SO4_init
C32_H2S(Bulk Volume) : H2S_init
s1_Zps(Bulk Volume) : xa_ps_init
s2_Zas(Bulk Volume) : xa_as_init
s3_Zhs(Bulk Volume) : xa_hs_init
C34_HS(Bulk Volume) : HS_init
C30_HSO4(Bulk Volume) : HSO4_init

```

```
Inflow: Qi
```

Loadings:

```

Variable : Loading
D1_Sbp : inSbpi_mol*Qi
B3_CODup : (inSupi/1000)*Qi
B1_CODus : (inSusi/1000)*Qi
D2_B2_Sbsf : (((inSbsfi/in_f_GlucCOD)/1000)/MW_Glucose)
*Qi

```

```

C7_H : inH*Qi+Qin*Hin
C13_HAc : inSbsaAHAc_mol*Qi
C28_HPr : inSbsaHPr_mol*Qi
C2_NH3 : inNH3*Qi
C1_B10_NH4 : inNH4*Qi
C5_CO3 : inCO3*Qi
C4_HCO3 : inHCO3*Qi
C3_H2CO3 : inH2CO3*Qi
C8_OH : inOH*Qi
C14_AC : inSbsaAAc_mol*Qi
C29_Pr : inSbsaHPr_mol*Qi
D3_H2 : H2_in*Qi
C32_H2S : Qi*H2S_in
C31_SO4 : Qi*SO4_in
Volume:          16
Accuracies:
  Rel. Acc. Q:    0.001
  Abs. Acc. Q:    0.001
  Rel. Acc. V:    0.001
  Abs. Acc. V:    0.001

```

Definitions of Calculations

```

Simulation:  Description:
             Calculation Number:  0
             Initial Time:        0
             Initial State:       given, made consistent
             Step Size:           0.0166666
             Num. Steps:          1440
             Status:              inactive for simulation
                                 inactive for sensitivity analysis
-----

```

```

Test:       Description:
            Calculation Number:  0
            Initial Time:        0
            Initial State:       given, made consistent
            Step Size:           1
            Num. Steps:          300
            Status:              active for simulation
                                 inactive for sensitivity analysis

```

Plot Definitions

Alkalinity_mgCaCO3:

Description:
 Abscissa: Time
 Title: Alcalinidad H2CO3
 Abscissa Label: d
 Ordinate Label: CaCO3 mg/l
 Curves:
 Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
 Value : outALK [0,Reactor,Bulk Volume,0]

 Alkalinity_mol:Description:

Abscissa: Time
 Title: H2CO3*Alkalinity
 Abscissa Label: d
 Ordinate Label: mol/
 Curves:
 Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
 Value : ALKmol [0,Reactor,Bulk Volume,0]

 Biomass_mol:

Description:
 Abscissa: Time
 Title: biomasa inicial en moles
 Abscissa Label: days
 Ordinate Label: mol/l
 Curves:
 Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
 Value : D4_Z_AD [0,Reactor,Bulk Volume,0]
 Value : D5_Z_AC [0,Reactor,Bulk Volume,0]
 Value : D6_Z_AM [0,Reactor,Bulk Volume,0]
 Value : D7_Z_HM [0,Reactor,Bulk Volume,0]
 Value : s1_Zps [0,Reactor,Bulk Volume,0]
 Value : s2_Zas [0,Reactor,Bulk Volume,0]
 Value : s3_Zhs [0,Reactor,Bulk Volume,0]

 Carbonate_mol: Description:

Abscissa: Time
 Title: carbonato inicial

Abscissa Label: dias
Ordinate Label: mol/l
Curves:
Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
Value : C3_H2CO3 [0,Reactor,Bulk Volume,0]
Value : C4_HCO3 [0,Reactor,Bulk Volume,0]
Value : C5_CO3 [0,Reactor,Bulk Volume,0]

CODpart_biomass:

Description:
Abscissa: Time
Title: mgDQO de Biomasa
Abscissa Label: dias
Ordinate Label: mg DQO/l
Curves:
Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
Value : out_ZAD [0,Reactor,Bulk Volume,0]
Value : out_ZAC [0,Reactor,Bulk Volume,0]
Value : out_ZAM [0,Reactor,Bulk Volume,0]
Value : out_ZHM [0,Reactor,Bulk Volume,0]
Value : out_Zhs [0,Reactor,Bulk Volume,0]
Value : out_Zps [0,Reactor,Bulk Volume,0]

CODpart_bpup: Description:
Abscissa: Time
Title: DQO biodegradable y no biodegradable
particulado mg DQO/l
Abscissa Label: d
Ordinate Label: mg DQO/l
Curves:
Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
Value : outCODbp [0,Reactor,Bulk Volume,0]
Value : outCODup [0,Reactor,Bulk Volume,0]

CODpart_bpup_mol:

Description:
Abscissa: Time
Title: DQO particulado biodegradable y no
biodegradable mg DQO/l
Abscissa Label: d
Ordinate Label: mg DQO/l
Curves:
Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
Value : D1_Sbp [0,Reactor,Bulk Volume,0]
Value : outCODup_mol [0,Reactor,Bulk Volume,0]

CODpart_total: Description:
 Abscissa: Time
 Title: DQO total particulado en mg DQO/l
 Abscissa Label: d
 Ordinate Label: md DQO/l
 Curves:
 Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
 Value : outCODtotpart [0,Reactor,Bulk Volume,0]

CODsol_bsf: Description:
 Abscissa: Time
 Title: DQO soluble biodegradable
 Abscissa Label: d
 Ordinate Label: mg DQO/l
 Curves:
 Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
 Value : outCODbs [0,Reactor,Bulk Volume,0]

CODsol_bsf_mol:Description:
 Abscissa: Time
 Title: concentracion inicial de Glucosa
 Abscissa Label: d
 Ordinate Label: mol/l
 Curves:
 Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
 Value : D2_B2_Sbsf [0,Reactor,Bulk Volume,0]

CODsol_H2_HS: Description:
 Abscissa: Time
 Title: DQO H2S/HS
 Abscissa Label: d
 Ordinate Label: mg DQO /l
 Curves:
 Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
 Value : outCODsol_H2S_HS [0,Reactor,Bulk Volume,0]

CODsol_organic:Description:
 Abscissa: Time
 Title: DQO total organico total
 Abscissa Label: d
 Ordinate Label: mg DQO/l
 Curves:
 Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
 Value : outCODsol_organic [0,Reactor,Bulk Volume,0]

CODsol_total: Description:

```

Abscissa:          Time
Title:             DQO total soluble
Abscissa Label:   d
Ordinate Label:   mg DQO/l
Curves:
  Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
  Value : outCODtotsol [0,Reactor,Bulk Volume,0]
-----
CODsol_us:        Description:
Abscissa:          Time
Title:             DQO soluble no biodegradable
Abscissa Label:   d
Ordinate Label:   g/l
Curves:
  Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
  Value : B1_CODus [0,Reactor,Bulk Volume,0]
-----
CODsol_VFA:       Description:
Abscissa:          Time
Title:             Concentracion de VFA
Abscissa Label:   d
Ordinate Label:   mg DQO/l
Curves:
  Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
  Value : outHAc_Ac [0,Reactor,Bulk Volume,0]
  Value : outHPr_Pr [0,Reactor,Bulk Volume,0]
-----
CODsol_VFAAc_mol: Description:
Abscissa:          Time
Title:             Acetato
Abscissa Label:   dias
Ordinate Label:   mol/l
Curves:
  Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
  Value : C13_HAc [0,Reactor,Bulk Volume,0]
  Value : C14_AC [0,Reactor,Bulk Volume,0]
-----
CODsol_VFAPr_mol: Description:
Abscissa:          Time
Title:             Systema del Propionato
Abscissa Label:   dias
Ordinate Label:   mol/l
Curves:
  Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]

```

Value : C28_HPr [0,Reactor,Bulk Volume,0]

Value : C29_Pr [0,Reactor,Bulk Volume,0]

 CODtotal: Description:
 Abscissa: Time
 Title: DQO total en mg DQO/l
 Abscissa Label: d
 Ordinate Label: mg DQO/l
 Curves:
 Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
 Value : outCODtot [0,Reactor,Bulk Volume,0]

 FSA_mgN: Description:
 Abscissa: Time
 Title: N disuelto en mg N/l
 Abscissa Label: mgN/l
 Ordinate Label:
 Curves:
 Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
 Value : outFSA [0,Reactor,Bulk Volume,0]

 Gas_CH4lperl_infl: Description:
 Abscissa: Time
 Title: Produccion de gas metano
 Abscissa Label: d
 Ordinate Label: l gas / l
 Curves:
 Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
 Value : out_CH4_volumen [0,Reactor,Bulk Volume,0]

 Gas_CH4_mol: Description:
 Abscissa: Time
 Title: Produccion de Gas metano
 Abscissa Label: d
 Ordinate Label: mol/l
 Curves:
 Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
 Value : P4_CH4 [0,Reactor,Bulk Volume,0]

 Gas_CO2_lperl_infl: Description:
 Abscissa: Time
 Title: Produccion de CO2 gas
 Abscissa Label: d
 Ordinate Label: l gas / l influente

Curves:
 Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
 Value : out_CO2_volumen [0,Reactor,Bulk Volume,0]

Gas_CO2_mol: Description:
 Abscissa: Time
 Title: produccion de CO2 gas
 Abscissa Label: d
 Ordinate Label: mol/l
 Curves:
 Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
 Value : P1_C6_CO2gas [0,Reactor,Bulk Volume,0]

Gas_H2S_lperl_infl:
 Description:
 Abscissa: Time
 Title: produccion de H2S gas
 Abscissa Label: d
 Ordinate Label: l gas / l influente
 Curves:
 Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
 Value : out_H2S_volumen [0,Reactor,Bulk Volume,0]

Gas_H2S_mol: Description:
 Abscissa: Time
 Title: produccion de H2S gas
 Abscissa Label: d
 Ordinate Label: mol/l
 Curves:
 Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
 Value : C33_H2Sgas [0,Reactor,Bulk Volume,0]

Gas_perMethane:Description:
 Abscissa: Time
 Title: % metano
 Abscissa Label: d
 Ordinate Label: %
 Curves:
 Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
 Value : out_Gas_PerMethane [0,Reactor,Bulk Volume,0]

Gas_Total_lperl_infl:
 Description:
 Abscissa: Time
 Title: produccion total de gas
 Abscissa Label: d

```

Ordinate Label:      1 gas / 1 influente
Curves:
  Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
  Value : out_Gas_Volumen [0,Reactor,Bulk Volume,0]
-----
H2S_HS:             Description:
                   Abscissa:      Time
                   Title:         concentracion de sulfito de hidrogeno
                                   no disociada consumida
                   Abscissa Label: d
                   Ordinate Label: conc (mol/l)
                   Curves:
                     Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
                     Value : C32_H2S [0,Reactor,Bulk Volume,0]
                     Value : C34_HS [0,Reactor,Bulk Volume,0]
                     Value : St [0,Reactor,Bulk Volume,0]
-----
H2S_HSmg:          Description:      concentracion de especies de sulfito
                                   consumidos
                   Abscissa:      Time
                   Title:         concentraicion de especies sulfito
                                   d
                   Abscissa Label: d
                   Ordinate Label: conc (mg/l)
                   Curves:
                     Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
                     Value : out_H2S [0,Reactor,Bulk Volume,0]
                     Value : out_HS [0,Reactor,Bulk Volume,0]
-----
H2_mol:            Description:
                   Abscissa:      Time
                   Title:         Hidrogeno disuelto
                   Abscissa Label: d
                   Ordinate Label: mol/l
                   Curves:
                     Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
                     Value : D3_H2 [0,Reactor,Bulk Volume,0]
-----
HSO4_in:           Description:      concentracion de HSO4 en el inluent
                                   e
                   Abscissa:      Time
                   Title:
                   Abscissa Label:
                   Ordinate Label:
                   Curves:
                     Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
                     Value : HSO4_in [0,Reactor,Bulk Volume,0]

```

```

-----
HSO4_SO4:      Description:      concentracion molar de especies su
                    lfato
                Abscissa:        Time
                Title:           concentracion de especies sulfato
                Abscissa Label:   d
                Ordinate Label:  mol/L
                Curves:
                    Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
                    Value : C31_SO4 [0,Reactor,Bulk Volume,0]
                    Value : C30_HSO4 [0,Reactor,Bulk Volume,0]
-----

```

```

-----
HSO4_SO4_mg:   Description:
                Abscissa:        Time
                Title:           concentracion de especies sulfato
                Abscissa Label:   d
                Ordinate Label:  conc. mg/l
                Curves:
                    Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
                    Value : out_SO4 [0,Reactor,Bulk Volume,0]
                    Value : out_HSO4 [0,Reactor,Bulk Volume,0]
-----

```

```

-----
H_mol:         Description:
                Abscissa:        Time
                Title:           especies H disueltas
                Abscissa Label:   d
                Ordinate Label:  mol/l
                Curves:
                    Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
                    Value : C7_H [0,Reactor,Bulk Volume,0]
-----

```

```

-----
inCarbonate_mol:
                Description:
                Abscissa:        Time
                Title:           especies inicial de carbonato
                Abscissa Label:   dias
                Ordinate Label:  mol/
                Curves:
                    Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
                    Value : inH2CO3 [0,Reactor,Bulk Volume,0]
                    Value : inHCO3 [0,Reactor,Bulk Volume,0]
                    Value : inCO3 [0,Reactor,Bulk Volume,0]
-----

```

```

-----
inCODpart_mgCOD:
                Description:
                Abscissa:        Time
-----

```

Title: DQO particulado inicial en el influente
 Abscissa Label: dias
 Ordinate Label: mg DQO/l
 Curves:
 Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
 Value : inSti [0,Reactor,Bulk Volume,0]
 Value : inSpi [0,Reactor,Bulk Volume,0]
 Value : inSupi [0,Reactor,Bulk Volume,0]
 Value : inSbpi [0,Reactor,Bulk Volume,0]

inCODsol_mgCOD:Description:
 Abscissa: Time
 Title: DQO soluble en el influente
 Abscissa Label: dias
 Ordinate Label: mg DQO/l
 Curves:
 Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
 Value : inSti [0,Reactor,Bulk Volume,0]
 Value : inSsi [0,Reactor,Bulk Volume,0]
 Value : inSbsfi [0,Reactor,Bulk Volume,0]
 Value : inSusi [0,Reactor,Bulk Volume,0]
 Value : inSbsaAi [0,Reactor,Bulk Volume,0]
 Value : inSbsaPi [0,Reactor,Bulk Volume,0]

inH2SHS: Description:
 Abscissa: Time
 Title: concentracion en el influente
 Abscissa Label: d
 Ordinate Label:
 Curves:
 Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
 Value : HS_in [0,Reactor,Bulk Volume,0]
 Value : H2S_in [0,Reactor,Bulk Volume,0]

inHSO4SO4: Description: concentracion de SO4 en el influente
 Abscissa: Time
 Title:
 Abscissa Label: d
 Ordinate Label:
 Curves:
 Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
 Value : SO4_in [0,Reactor,Bulk Volume,0]
 Value : HSO4_in [0,Reactor,Bulk Volume,0]

inNH3NH4_mol: Description:
Abscissa: Time
Title: NH3/NH4 en el influente
Abscissa Label: dias
Ordinate Label: mol/
Curves:
Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
Value : inNH3 [0,Reactor,Bulk Volume,0]
Value : inNH4 [0,Reactor,Bulk Volume,0]

NH3NH4_mol: Description:
Abscissa: Time
Title: NH3/NH4 en el sistema
Abscissa Label: dias
Ordinate Label: mol/l
Curves:
Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
Value : C2_NH3 [0,Reactor,Bulk Volume,0]
Value : C1_B10_NH4 [0,Reactor,Bulk Volume,0]

OH_mol: Description:
Abscissa: Time
Title: especies OH disueltos
Abscissa Label: d
Ordinate Label: mol/l
Curves:
Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
Value : C8_OH [0,Reactor,Bulk Volume,0]

pH: Description:
Abscissa: Time
Title: pH lliquido
Abscissa Label: d
Ordinate Label: pH
Curves:
Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
Value : pH [0,Reactor,Bulk Volume,0]

SO3_mg: Description:
Abscissa: Time
Title: concentracion de especies sulfato
Abscissa Label: d
Ordinate Label: conc mog/l
Curves:
Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
Value : out_SO4 [0,Reactor,Bulk Volume,0]

```

-----
SO4_in:      Description:
              Abscissa:      Time
              Title:         concentracion de SO4 en el influent
                              e
              Abscissa Label:
              Ordinate Label:
              Curves:
                Type : Variable [CalcNum,Comp.,Zone,Time/Space]
                Value : SO4_in [0,Reactor,Bulk Volume,0]

```

```
*****
```

```

*****
Calculation Parameters
*****
Numerical Parameters:  Maximum Int. Step Size: 1
                       Maximum Integrat. Order: 5
                       Number of Codiagonals: 1000
                       Maximum Number of Steps: 1000

```

```

-----
                       Fit Method:      secant
                       Max. Number of Iterat.: 100
*****

```

```

*****
Calculated States
*****
Calc. Num.  Num. States  Comments
0           1           Range of Times: 0
*****

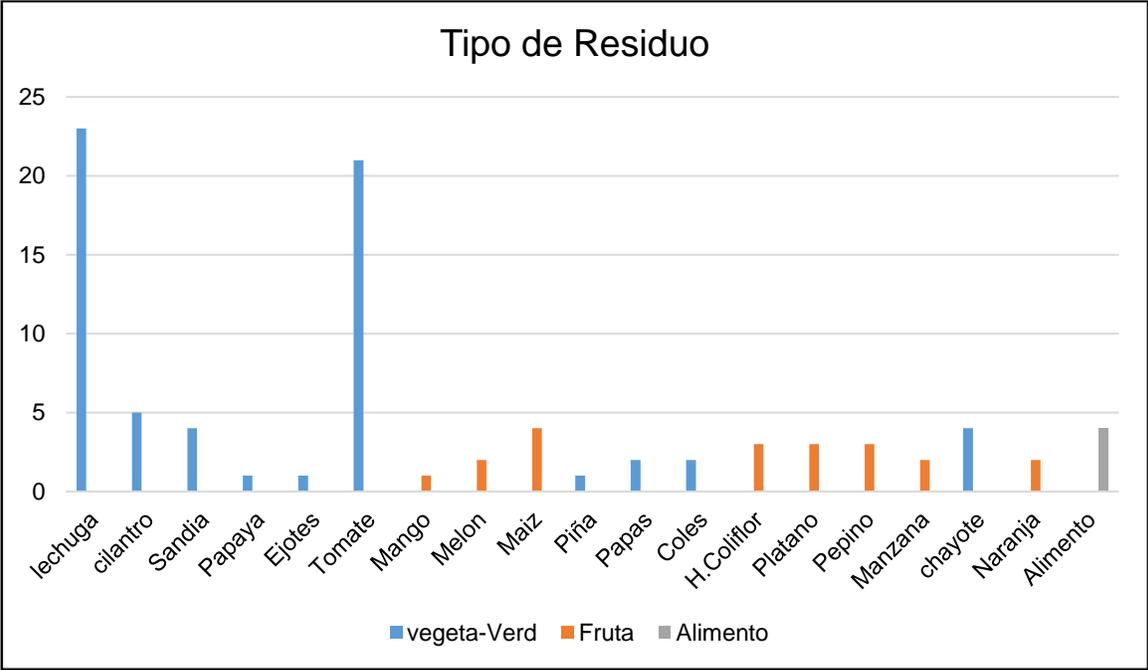
```

ANEXO (D)

Gráfica de Caracterización de Residuos Orgánicos del Mercados de Rio Blanco

Anexo D

Caracterización de los Residuos Orgánicos del mercado de rio blanco



Esta gráfica representa del lado izquierdo el número de establecimientos vs tipo de residuo que genera habitualmente y es desechado. El cual podemos observar que la lechuga o la hoja de lechuga y el tomate es lo más desechado por su rápida descomposición, seguido del Tomate, Cilantro, Chayote, Maíz, Sandía, Plátano, Pepino, Manzana, Melón, Coliflor, Coles. Y complementados por otros Residuos Organicos los cuales pueden variar dependiendo de la temporada.