



Universidad de Guanajuato

DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

Campus León

Construcción de un prototipo económico
para la evaluación de la biodegradabilidad
de materia orgánica bajo condiciones
anaerobias

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

P R E S E N T A:

Jorge Adrián Botello Rueda

Directora:

Doctora Iraís Amaranta Quintero Ortega

Codirectora:

Doctora Laura Edith Castellano Torres

León, Guanajuato.

Enero de 2020

Se agradece a la Secretaría de Innovación, Ciencia y Educación Superior (SICES) por el apoyo para el fortalecimiento del programa de la Maestría en Ciencias Aplicadas a través del convenio: PNPC/SICES/CONV/190/2019UG. así como al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado durante mis estudios de posgrado. Número de beca: 622781

Índice

| | |
|---|-----------|
| Índice de figuras | 5 |
| Índice de tablas | 5 |
| Abreviaturas | 6 |
| Resumen | 7 |
| 1 Antecedentes | 8 |
| 1.1 Problemática mundial y nacional | 8 |
| 1.2 Desechos sólidos urbanos | 9 |
| 1.3 Generación de energía | 11 |
| 1.4 Biodigestión anaerobia | 12 |
| 1.5 Medición de la biodegradabilidad | 16 |
| 2 Justificación | 19 |
| 3 Hipótesis | 20 |
| 4 Objetivos | 20 |
| 4.1 Objetivo general | 20 |
| 4.2 Objetivos particulares | 20 |
| 5 Metodología | 21 |
| 5.1 Construcción del sistema de calefacción | 21 |
| 5.2 Construcción de los reactores | 22 |
| 5.2.1 Reactor fabricado a partir de frascos de vidrio. | 23 |
| 5.2.2 Construcción de reactores a partir de frascos de laboratorio autoclavables. | 24 |
| 5.3 Conexión entre el sensor, tarjeta controladora y computadora | 25 |
| 5.4 Muestra y pretratamiento | 25 |
| 5.5 Lodos anaerobios | 26 |
| 5.6 Metodologías de caracterización de los lodos anaerobios y el sustrato | 26 |
| 5.6.1 Determinación de sólidos volátiles y sólidos totales | 26 |
| 5.6.2 Determinación de la alcalinidad | 27 |
| 5.6.3 Medición de los carbohidratos totales en disolución | 27 |
| 5.6.4. Determinación de la concentración de las proteínas totales en disolución | 28 |
| 5.6.5 Determinación de la cantidad de grasa | 29 |
| 5.6.6 Método de preparación del medio de cultivo | 30 |

| | |
|--|----|
| 5.7 Preparación de prueba de biodegradabilidad | 30 |
| 5.7.1 Corrida en reactores hechos con frascos de vidrio y filtro de NaOH externo | 30 |
| 5.7.2 Corridas con reactores con filtro de NaOH interno | 31 |
| 6 Resultados y discusión | 33 |
| 6.1 Construcción del prototipo | 33 |
| 6.1.1 Calefacción | 33 |
| 6.1.2 Sensores de presión | 35 |
| 6.1.3 Ubicación de los filtros de NaOH | 38 |
| 6.2 Prueba de biodegradabilidad | 40 |
| 6.2.1 Inóculo | 40 |
| 6.2.2 Sustrato | 41 |
| 6.2.3 Biodegradabilidad del sustrato | 42 |
| 6.3 Costo del prototipo y su comparación respecto equipos comerciales. | 46 |
| 7 Conclusión | 48 |
| 8 Perspectivas | 48 |
| 9 Bibliografía | 49 |
| Anexos A | 51 |
| Anexos B | 53 |
| Anexos C | 55 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| <i>Figura 1. Etapas de la digestión anaerobia.</i> | 15 |
| <i>Figura 2. Forma final de los dos métodos de unión entre el filtro y el digester construido a partir de frascos de vidrio tipo Gerber.</i> | 24 |
| <i>Figura 3. Sistema digester-filtro construido a partir de frasco de laboratorio.</i> | 25 |
| <i>Figura 4. Curva patrón de concentración de glucosa contra absorbancia.</i> | 28 |
| <i>Figura 5. curva patrón de concentración de albúmina sérica bovina contra absorbancia.</i> | 29 |
| <i>Figura 6. Filtro interno para el reactor hecho a partir de un tubo cónico.</i> | 32 |
| <i>Figura 7. Termostato utilizado para el control de la temperatura.</i> | 35 |
| <i>Figura 8. Sensor de presión, empaque y tuerca.</i> | 36 |
| <i>Figura 9. Comparación entre dos curvas representativas.</i> | 37 |
| <i>Figura 10. Variabilidad de las mediciones normalizadas respecto a los valores promedio evaluadas cada hora.</i> | 38 |
| <i>Figura 11. Variabilidad de las mediciones normalizadas respecto a los valores promedio evaluados cada minuto.</i> | 38 |
| <i>Figura 12. Reactores de biodigestión.</i> | 39 |
| <i>Figura 13. Corridas de biodegradabilidad.</i> | 40 |
| <i>Figura 14. Diferentes etapas del sustrato a través del pretratamiento.</i> | 42 |
| <i>Figura 15. Curvas representativas de tres corridas que muestran los resultados de las pruebas de degradabilidad.</i> | 44 |
| <i>Figura 16. Resultados representativos de las pruebas 3 y 4 de biodegradabilidad.</i> | 45 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| <i>Tabla 1. Materiales utilizados para la construcción del sistema de calefacción.</i> | 22 |
| <i>Tabla 2. Materiales utilizados para la construcción de los biodigestores.</i> | 22 |
| <i>Tabla 3. Volumen de solución patrón de glucosa y volumen de agua por tubo para la realización de la curva patrón.</i> | 27 |
| <i>Tabla 4. Volumen de solución patrón de albúmina sérica bovina y volumen de agua por tubo para la realización de la curva patrón.</i> | 28 |
| <i>Tabla 5. Compuestos y pesos usados para la preparación de 1L de medio de cultivo base, que para su uso deberá diluirse 1/10.</i> | 30 |
| <i>Tabla 6. Características del inóculo.</i> | 41 |
| <i>Tabla 7. Se muestra las características del sustrato antes y después del pretratamiento.</i> | 42 |
| <i>Tabla 8. Se presentan las diferentes condiciones a las que se corrieron las pruebas de biodegradabilidad.</i> | 43 |

Abreviaturas

| | |
|-------------------------|---|
| AMPTS | Automatic Methane Potential Test System |
| CPU | Unidad Central de Procesamiento |
| DQO | Demanda Química de Oxígeno |
| HBP | Heated build Platform |
| LGPGIR | Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos |
| MtCO₂ | Millones de Toneladas de CO ₂ |
| Mtoe | Million Tonnes of Oil Equivalent |
| NOM | Norma Oficial Mexicana |
| ST | Sólidos Totales |
| SV | Sólidos volátiles |
| UASB | Upflow Anaerobic Sludge Blanket |

Resumen

La digestión anaerobia ha sido aplicada para la reducción y aprovechamiento de los residuos orgánicos con el objeto de mitigar una parte de los problemas ambientales y energéticos que se viven en la actualidad. En México, la digestión anaerobia se ha difundido con mayor fuerza en zonas rurales donde la fracción de desechos orgánicos es alta y los ingresos económicos son bajos; de ahí que existan programas de construcción de biodigestores en zonas principalmente pobres. Empero, su aplicación requiere pruebas preliminares que indique la factibilidad del proceso a través de la medición del potencial metanogénico del residuo orgánico que se desea aprovechar. Estos ensayos, conocidos como pruebas de biodegradabilidad son generalmente costosas o requieren personal especializado que difícilmente se encuentra en las zonas donde se promueve la aplicación de la biodegradación anaerobia. Por tal motivo, en el presente estudio se muestran los pasos para la construcción de un prototipo económico y accesible que puede emplearse para realizar pruebas de biodegradabilidad con resultados consistentes con estudios similares realizados con equipos comerciales, con el fin de facilitar la implementación de esta tecnología incluso en zonas con recursos económicos escasos.

Palabras clave: *biodegradabilidad, digestión anaerobia, prototipo*

1 Antecedentes

1.1 Problemática mundial y nacional

De las dificultades que se prevén a futuro en un contexto mundial, muchas de ellas consisten en problemáticas locales cuyo impacto está limitado a una región o comunidad. Pero existen otras que lejos de amenazar a un sector particular, ponen en riesgo la forma de vida de los habitantes del planeta (Chomsky 2017). Estas últimas han motivado a diferentes naciones a colaborar entre sí para proponer acciones que conlleven, sino a una solución total, sí a alternativas que mitiguen las consecuencias más inmediatas.

De los problemas que amenazan al ser humano a una escala global, tal vez el cambio climático sea el más conocido y difundido a la población general, por lo que es cada vez más común que los diferentes líderes mundiales manifiesten su preocupación y propongan acciones tanto en contextos mundiales, nacionales y estatales (ONU 1997; ONU 2015). Sin embargo, debe enfatizarse que aún con la gran difusión y acuerdos, el problema está lejos de ser solucionado, pues el cambio climático es consecuencia de las interrelaciones políticas, económicas y sociales del ser humano, por lo que el problema no debe ser reducido a la sola cuantificación y control de emisiones de gases de efecto invernadero.

Además del cambio climático, existen otras dificultades medioambientales como son: la pérdida de biodiversidad, erosión del suelo, disponibilidad de agua, calidad del aire, agotamiento del ozono estratosférico, entre otras (Dincer 2000; Etchevers et al. 2006; Illoldi-rangel et al. 2007). Todos estos problemas se relacionan entre sí, generando un problema medioambiental complejo, que es agravado por una carrera hacia la productividad, donde las necesidades económicas priman sobre las medioambientales. Aunado a lo anterior, la humanidad vive un periodo de crisis energética que, aunque no implica que la energía del mundo este por terminarse, si quiere decir que la energía barata que ha permitido a las naciones más ricas ocupar su posición mundial actual está por agotarse; dejando así a las naciones en vías de

desarrollo en desventaja competitiva o a expensas de tipos de energía más agresivas con el entorno (Holdren 1991).

En el contexto mexicano, esta desventaja se ha consolidado en la reforma energética del 2013, con la que se promueve la participación privada en el sector energético con el fin de evitar que México pase de un país exportador a uno importador de petróleo. Sin embargo, esta decisión trae consigo problemáticas ambientales al propiciar la aplicación de técnicas no convencionales de extracción, potencialmente dañinas, como son la perforación horizontal y la fracturación hidráulica (Castro-Alvarez et al. 2018). Pese a lo anterior, México ha proclamado abiertamente su deseo de hacer su parte en materia ambiental, fijando metas concretas como reducir en un 30% las emisiones de CO₂, para el año 2020 y en un 50 % para el año 2050 con referencia al año 2000 (Semarnat 2015); promover el uso de energías renovables; proteger la biodiversidad; tratar el 100 % de las aguas municipales e industriales para el año 2030; entre otras (ONU 2016). Es necesario observar que en términos generales un desarrollo económico basado en la industria choca con un ideal de sustentabilidad, por lo que tanto en un contexto mundial como uno nacional debe reevaluarse si las tendencias actuales de producción y de consumo son sostenibles a largo plazo, sin embargo, el ímpetu por el crecimiento que se ha promovido e incrustado en cada nación hace difícil que dichas tendencias en favor de la productividad sean revertidas delegando la responsabilidad y esperanza en desarrollos científico-tecnológicos capaces de generar las condiciones propicias para el crecimiento sin afectar al medio ambiente.

1.2 Desechos sólidos urbanos

La generación de desechos es común en la naturaleza, cada organismo consume de sus alrededores lo que necesita y en contraparte libera al exterior lo que le sobra o no necesita. Con el desarrollo de sociedades complejas, el ser humano ha llevado al extremo ese comportamiento natural, ahora los organismos que consumen y desechan no sólo son entidades orgánicas aisladas, sino complejos sistemas de producción que requieren una cantidad cada vez mayor de recursos y que generan, a su vez, cantidades altas de desechos. Actualmente se producen en el mundo

cerca de 2.01 mil millones de toneladas de desechos urbanos al año y se estima que para el año 2050 se llegue a 3.4 mil millones de toneladas (Kaza et al. 2019). Por lo anterior, cada país debe poseer un sistema de manejo de residuos apropiado que contemple tanto la recolección, el transporte, el tratamiento y la disposición; y aunque cada una de estas etapas cuenta con sus propios desafíos, es la última la que determina la verdadera eficacia de un sistema de tratamiento. Actualmente, el 37 % de la totalidad mundial de los desechos termina en rellenos sanitarios, 11 % en incineradores, 33 % en tiraderos no controlados, y el 19 % en plantas recicladoras (Kaza et al. 2019). Naturalmente, las proporciones para cada país varían de acuerdo con condiciones propias. De manera general, las naciones con mayores recursos económicos generan más desechos que los de menores recursos; el 16 % de los países más ricos generan el 34 % de los desechos totales; sin embargo, cuentan con un mayor control en la disposición de sus desechos; el 93 % de los residuos urbanos que llegan a sitios no controlados proceden de países de bajos recursos. (Kaza et al. 2019).

En México, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) agrupa a los residuos nacionales en tres categorías: residuos peligrosos, sólidos urbanos y de manejo especial. Los primeros se refieren a residuos que por sus características pueden representar un riesgo para el ser humano o el entorno y deben ser dispuestos según la Norma Oficial Mexicana NOM-052-Semarnat-2005. La disposición de los residuos sólidos urbanos y los de manejo especial son regulados por la norma NOM-083-Semarnat-2003 y corresponden, respectivamente a los desechos producidos en las casas habitación y los generados por procesos productivos siempre que no generen riesgo.

Actualmente, no se conoce con precisión la situación en materia de residuos urbanos a pesar de que la LGPGIR establece el desarrollo de un diagnóstico básico para la gestión integral de residuos. El último documento publicado con esa finalidad fue en el año 2012 y el anterior a ese en el 2006. Aun así, es posible generar una imagen de la situación con los datos disponibles. Según el documento Visión Nacional Hacia una Gestión Sustentable publicado en enero del 2019, la generación anual de desechos urbanos en México supera los 44 millones de toneladas y se

prevé que la cifra alcance los 65 millones para el año 2030, con un promedio *per cápita* de 0.86 kg/día (Semarnat 2019). Sin embargo, fuentes internacionales sugieren que la generación anual alcanza los 53 millones de toneladas de residuos urbanos al año con una generación *per cápita* de entre 1 y 1.49 kg/día (Kaza et al. 2019). En cuanto a la disposición de los desechos, el 70 % termina en rellenos sanitarios o sitios controlados, el 25 % en tiraderos a cielo abierto y el 5 % se recicla, aunque dichas proporciones varían en todo el territorio nacional (Semarnat 2019). Los datos mencionados, correspondientes a la generación de desechos y a su disposición, son un reflejo del crecimiento económico de cada sociedad y, por tal motivo, pueden ser utilizados como indicador del consumo energético. De lo anterior se sigue que existe una relación entre la cantidad de desechos que se generan y la cantidad de energía con la que se dispone. A continuación, se mencionarán las principales fuentes de donde se obtiene la energía.

1.3 Generación de energía

A lo largo de los años, los grandes yacimientos de coque, petróleo y gas natural han permitido el desarrollo de la humanidad, pero a medida que la demanda energética y los riesgos ambientales aumentan se ha reconocido, tanto por el sector científico como por la mayoría de los tomadores de decisiones a nivel mundial, la inviabilidad de la economía basada en combustibles fósiles, y sin embargo, son la fuente de generación del 82 % de la energía mundial (Enerdata 2019; IEA 2017). En el 2017, se consumieron 14,100 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtoe) de los cuales, sólo el 25.6 % provino de energías renovables, emitiéndose así 32,667 millones de toneladas de CO₂ (MtCO₂) producto de la generación de energía (Enerdata 2019).

En México, el consumo de energía en el 2017 se redujo en un 3.1 % respecto al año anterior, generándose 186 Mtoe (Enerdata 2019) de los cuales el 88 % provino de combustibles fósiles y tan sólo el 9.5 % de energías renovables que incluyen la geotérmica, solar, eólica, hídrica y biomasa que en su conjunto forman el llamado “mix energético” (Beltrán et al. 2018).

Debe reconocerse que la transición energética es una tarea compleja que no puede cumplirse en un periodo corto. La dependencia de los combustibles fósiles aún ocupa una posición geoestratégica central; como han dejado claro las políticas del nuevo gobierno en cuanto al robo de combustible y su propuesta para aumentar la infraestructura petrolera (Obrador 2019); intentando así, recuperar la autonomía energética que se había cedido a grupos criminales.

Aún con este intento de fortalecer la infraestructura energética basada en combustibles fósiles, se reconoce la necesidad de migrar a fuentes energéticas menos dañinas y sostenibles. A este respecto, la Prospectiva de Energías Renovables pretende incrementar la tasa de crecimiento de este tipo de energías a un 7.4 % entre los años 2017 y 2031, dando especial participación a las celdas fotovoltaicas (Coldwell et al. 2017). Del conjunto de fuentes renovables de energía existentes en México, el sector biomasa aporta la mayor cantidad generando el 5.8 % del total de energía, siendo su principal área de aplicación en la industria azucarera. Mientras que el resto de las fuentes han mantenido un crecimiento anual con una modesta generación de energía (Beltrán et al. 2018).

Del sector correspondiente a los biocombustibles, el biogás producto de una degradación anaerobia, el cual se verá con mayor profundidad a continuación, no ha representado ningún aporte sustancial en la generación de energía, pero ha sido útil en el autoabastecimiento de energía de algunas plantas de tratamiento de agua y rellenos sanitarios (Semarnat 2016).

1.4 Biodigestión anaerobia

Con lo mencionado hasta ahora, se intenta dejar claro que no existe una fuente energética capaz de sustituir totalmente los combustibles fósiles. Pero, reducir la dependencia hacia ellos con fuentes de energía renovables y menos dañinas es un buen paso hacia la solución. Una de muchas posibles fuentes renovables de energía es el biogás, producto de la digestión anaerobia y que se compone principalmente de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) (Batstone et al. 2002); su principal ventaja consiste en la reducción de gran parte del volumen de desechos orgánicos, que de otra forma terminarían en rellenos sanitarios, al tiempo que producen

mejoradores de suelo (Cotabarren et al. 2019) que pueden ser usados para reducir el costo que implica la compra o fabricación de algunos fertilizantes.

La digestión anaerobia consiste en la degradación de la materia orgánica, en ausencia de oxígeno, por la acción de una microbiota capaz de mineralizar grandes cantidades de compuestos orgánicos permitiendo que cerca del 90 % de la energía contenida en la materia orgánica permanezca en forma de metano (CH₄) (M. Mcinerney and Bryant 1981). La digestión anaerobia ocurre en diferentes etapas, y cada una de éstas, se lleva a cabo por un grupo de microorganismos diferente. Es importante señalar que, por tratarse de un proceso biológico, las condiciones a las cuales ocurre la digestión favorecen o inhiben las distintas rutas metabólicas.

Los microorganismos que participan en la digestión anaerobia se relacionan a través de un tipo de simbiosis conocida como sintropía, la cual permite a microorganismos metabolizar compuestos que de manera individual no podrían (Morris et al. 2013). Lo anterior ocurre gracias a la cooperación entre al menos dos microorganismos; uno consume los productos metabólicos que el otro genera, de esa forma los productos del segundo se mantienen a concentraciones lo suficientemente bajas para que la reacción, infactible en otras condiciones, se vuelva termodinámicamente posible (M. J. Mcinerney, Sieber, and Gunsalus 2009). La biodigestión anaerobia se divide en 4 etapas de acuerdo con los grupos sintrópicos que dominan en un momento dado la digestión. Estas etapas son: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

La primera etapa del proceso de biodigestión anaerobia es la hidrólisis. En ella las macromoléculas como proteínas, lípidos y carbohidratos son degradadas a aminoácidos, ácidos grasos y monosacáridos respectivamente a través de enzimas hidrolíticas liberadas por las bacterias (Vavilin et al. 2008). Y, aunque en esta etapa participan microorganismos filogenéticamente diversos, se pueden distinguir dos filums principales: *Bacteroidetes* y *Firmicutes* (Venkiteshwaran et al. 2015). Existen dos modelos conceptuales de la hidrólisis, en el primero la bacteria libera las enzimas hidrolíticas al medio degradando así las macromoléculas disueltas y en el segundo, el microorganismo se adhiere a una partícula de sustrato hidrolizando sólo el área cercana a ella (Jain et al. 1992; Vavilin et al. 2008).

En la segunda etapa del proceso de biodigestión, llamada acidogénesis, los polisacáridos, aminoácidos y ácidos grasos son convertidos en azúcares simples, amoníaco (NH_3), ácidos grasos de cadena corta, dióxido de carbono (CO_2), hidrógeno (H_2) y alcoholes (Leng et al. 2018). En este punto de la degradación anaerobia los productos se pueden clasificar en dos grupos: 1) el formado por acetato, formato, hidrógeno (H_2), dióxido de carbono (CO_2) y otros compuestos de un sólo átomo de carbono (compuestos C1) y, 2) el formado por butirato, propionato, lactato y etanol (Leng et al. 2018; Madigan et al. 2015); a estos últimos se les agrupa con el nombre de ácidos grasos volátiles (Batstone et al. 2002; Angelidaki, Ellegaard, and Ahring 1993). Los filums que participan en la etapa acidogénica son: *Firmicutes*, *Bacteroidetes*, *Proteobacteria*, *Chloroflexi* y *Actinobacteria* (Cai et al. 2016; Leng et al. 2018).

Los productos del grupo uno pueden ser metabolizados directamente por microorganismos metanogénicos para generar metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) (Lauwers et al. 2013; Batstone et al. 2002). En el caso de los ácidos grasos volátiles del grupo dos pasan por una etapa adicional llamada acetogénesis, donde el butirato, propionato, lactato y etanol son transformados a acetato, formato, hidrógeno (H_2), dióxido de carbono (CO_2) y compuestos C1, los cuales a su vez podrán ser metabolizados por metanógenos (Madigan et al. 2015; Lauwers et al. 2013). Los filum relacionados con la degradación del propionato son *Syntrophobacter*, *Smithella* y *Pelotomaculum*. Mientras que los relacionados con la del butirato son *Syntrophomonas* y *Sintrophothermus* (Cai et al. 2016; Venkiteshwaran et al. 2015).

La última etapa del proceso de biodegradación anaerobia es la metanogénesis. Es llevada a cabo por un grupo de microorganismos anaerobios estrictos pertenecientes al dominio de las Arqueas y conocidos como metanógenos (Madigan et al. 2015) que transforman los productos de la acetogénesis en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) a través de cuatro vías: 1) la acetoclástica, 2) la hidrogenotrófica, 3) la metilotrófica y 4) la sintrópica en la que participan bacterias oxidantes del acetato y microorganismos metanógenos hidrogenotróficos (Leng et al. 2018; Schink 1997).

En la vía acetoclastica se transforma el acetato directamente a dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4). En la hidrogenotrófica los microorganismos utilizan al hidrógeno (H_2) y al formato para reducir al dióxido de carbono (CO_2), formando metano (CH_4). En la vía metilotrónica, el metano (CH_4) se produce a partir de un grupo metilo. Y en la última vía (sintrópica), las bacterias oxidantes del acetato y metanógenos hidrogenotróficos se relacionan sintrópicamente transformando el acetato en metano (CH_4) de manera indirecta a través del dióxido de carbono (CO_2) e hidrógeno (H_2) como intermediarios (Leng et al. 2018; Schink 1997). Cabe mencionar que de todos los precursores de la metanogénesis, sólo del acetato se produce el 70 % del metano total generado en una digestión anaerobia (Leng et al. 2018; M. Mcinerney and Bryant 1981). En la **figura 1**, se esquematizan las etapas mencionadas en el proceso de biodigestión anaerobia.

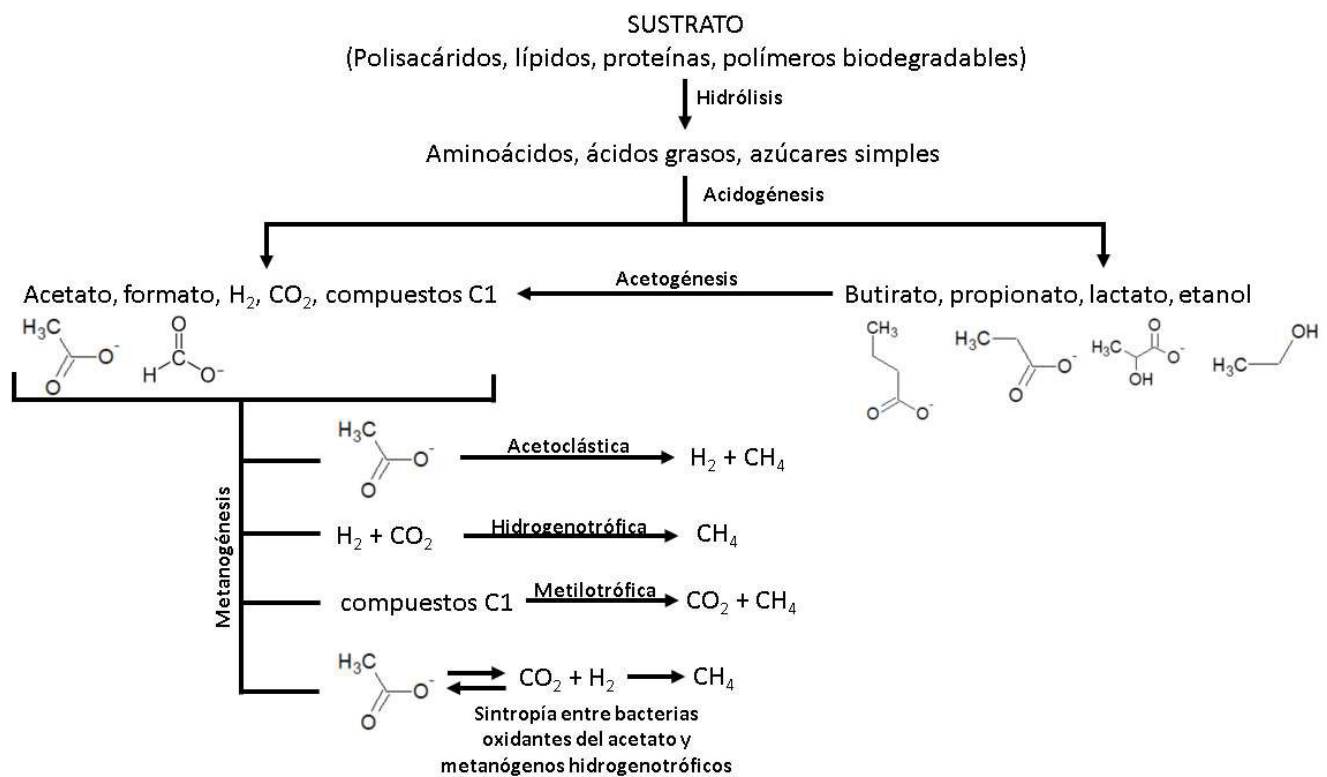


Figura 1. Etapas de la digestión anaerobia.

Se muestran las 4 etapas de la digestión anaerobia: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. También se muestran las cuatro rutas en las que se puede generar metano: acetoclástica, hidrogenotrófica, metilotrónica y por sintropía entre bacterias oxidantes del acetato y metanógenos hidrogenotróficos.

1.5 Medición de la biodegradabilidad

Cuando se desea conocer las condiciones óptimas bajo las cuales determinada sustancia es biodegradada, es necesario realizar pruebas de biodegradabilidad. Los elementos básicos para realizar la prueba son: el sustrato, el inóculo y el medio de cultivo (Angelidaki and Sanders 2004).

El primero de ellos, el sustrato, consiste en la sustancia que sea capaz de servir como alimento para los diferentes microorganismos participantes en un proceso de degradación. Los sustratos más comunes son desechos de comida, lodos de plantas de tratamiento de agua, excremento de ganado, restos de cultivos (Raposo, Rubia, and Borja 2011; Uçkun et al. 2014) y, más recientemente, se han empleado combinaciones entre estos (González-gonzález et al. 2013). Cada sustrato presenta condiciones particulares que dificultan la directa generalización de resultados y hace necesarias pruebas de biodegradabilidad previas a cualquier implementación.

Debido a la gran variedad de posibles sustratos, es necesaria una caracterización mínima que permita conocer sus propiedades y, de esa forma, facilitar la comparación de los resultados entre pruebas con distintos sustratos (Angelidaki et al. 2009). Las pruebas de caracterización básicas comprenden: Sólidos Volátiles (SV), Sólidos Totales (ST), Demanda Química de Oxígeno (DQO), nitrógeno total, fósforo total, tamaño de partícula y contenido de materia orgánica no fácilmente degradable como lignina, celulosa y hemicelulosa (Angelidaki and Sanders 2004).

El segundo elemento, el inóculo, consiste en los microorganismos que se espera sean capaces de degradar al sustrato. Las fuentes principales son lodos de reactores anaerobios. Al igual que el sustrato se debe caracterizar, generalmente con mediciones de ST, SV, DQO y pH; también es importante mencionar la procedencia y, de provenir de un reactor anaerobio, indicar el tipo de reactor, características de sustrato, así como la temperatura de trabajo del reactor de donde provienen los lodos (Angelidaki et al. 2009).

El último elemento, el medio de cultivo, consiste en una solución que contiene los nutrientes necesarios para el correcto crecimiento de la microbiota, que incluyen macronutrientes como el nitrógeno, fósforo, azufre, potasio, magnesio, sodio, calcio, hierro; micronutrientes como cromo, cobalto, cobre, manganeso, molibdeno, níquel,

selenio, vanadio y zinc; así como vitaminas, aminoácidos esenciales, purinas y pirimidinas (Angelidaki and Sanders 2004). Debe enfatizarse, que la fuente de carbono debe de provenir solamente del sustrato y nunca del medio.

La prueba de biodegradabilidad se realiza monitoreando la generación de biogás dentro de un reactor cerrado a una temperatura específica al combinarse el sustrato, el inóculo y el medio de cultivo en proporciones que dependen del diseño experimental del investigador; la duración de la prueba dependerá de la facilidad o dificultad del sustrato para ser degradado y los resultados suelen presentarse en gráficas de tiempo contra volumen de metano o biogás de tendencia logarítmica (Elbeshbishy, Nakhla, and Hafez 2012; Campuzano and González-martínez 2015) y se utilizan para obtener parámetros cinéticos y de operación importantes como: rapidez de degradación, constantes cinéticas, tiempos hidráulicos de residencia, producción de metano a tiempos de retención infinitos, entre otros (Hashimoto and Chen 1978).

El método principal con el que se puede llevar el seguimiento de una prueba de degradabilidad es a través de la medición de la composición del biogás por medio de un cromatógrafo de gases. Este método es el ideal ya que permite conocer con certeza si el producto de interés se está produciendo o no. Sin embargo, no siempre se cuenta con los recursos suficientes para llevar el control de la biodegradabilidad por este método por lo que también se utilizan formas menos directas de seguir el proceso.

Una forma común con la que se puede monitorear el proceso de biodegradación consiste en la medición de la presión dentro del biodigestor (Parra-Orobio et al. 2015; Angelidaki and Sanders 2004), este método se basa en que la mayor cantidad de gas generado durante un proceso de digestión anaerobia está compuesto por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) (Batstone et al. 2002), por lo que, si se realiza la digestión en presencia de una sustancia capaz de reaccionar con el dióxido de carbono (CO_2), como el hidróxido de sodio (NaOH) (Shim et al. 2016), la presión observada dentro del reactor será consecuencia de la cantidad de metano (CH_4) generado durante el proceso. Por tal razón, podemos encontrar equipos comerciales que hacen uso de soluciones de hidróxido de sodio (NaOH) como filtro

del dióxido de carbono (CO₂) para monitoreo del volumen de biogás por medio de un sistema de desplazamiento de agua como el *AMPTS II (Automatic Methane Potential Test System)* de la marca *bioprocess control*; u, otros equipos que emplean como filtro al NaOH sólido y un manómetro digital con el que monitorean la presión del biogás como el *System OxiTop® Control* de la marca *WTW (Wissenschaftlich-Technische-Werkstätten)*.

2 Justificación

En México es común la instalación de biodigestores en comunidades rurales con el fin de solventar parte de sus necesidades energéticas. Sin embargo, frecuentemente dichos biodigestores son subutilizados o abandonados, posiblemente debido a que la instalación no se complementa con capacitación hacia los usuarios que facilite el entendimiento sobre el funcionamiento y evite problemas de operación posteriores a la instalación. Una de las razones por las que podría omitirse dicha capacitación puede deberse a la dificultad de dotar de equipos sofisticados a las comunidades beneficiadas. Sin embargo, el acceso a dichos equipos sería benéfico al permitir prever si un cambio en las características en la alimentación o en las condiciones ambientales pudiera afectar negativamente al proceso.

El presente estudio se propone desarrollar un dispositivo económico y de libre acceso capaz de realizar pruebas de biodegradabilidad, permitiendo que cualquiera pueda desarrollar su equipo y logre con ello conocer más sobre el proceso de biodigestión evitando así el abandono de biodigestores por falta de recursos. Es verdad que el abandono de los biodigestores no sólo se debe a la falta de tecnología económica para el monitoreo y control del proceso, pero el acceso a dicha tecnología podría permitir que se incentive la capacitación a las comunidades beneficiadas aumentando así las posibilidades de que proyectos sociales de este tipo tengan éxito.

3 Hipótesis

A través de un frasco hermético conectado a un filtro de NaOH, un sensor de presión y una tarjeta de desarrollo de proyectos puede construirse un prototipo económico que mida la biodegradabilidad de una muestra de residuos orgánicos.

4 Objetivos

4.1 Objetivo general

Desarrollar un prototipo económico capaz de evaluar la biodegradabilidad de una muestra de materia orgánica a través del monitoreo de la presión interna del biodigestor.

4.2 Objetivos particulares

1. Diseñar y construir el sistema de calefacción del prototipo que permitirá el control de la temperatura durante el proceso de biodigestión.
2. Diseñar y construir los reactores de biodigestión, donde se evaluará la biodegradabilidad de la muestra de materia orgánica.
3. Evaluar la estabilidad del prototipo por medio de pruebas a diversos tiempos de operación.
4. Realizar pruebas de biodigestión usando como sustrato residuos de alimento procedentes de la ciudad León Guanajuato.

5 Metodología

5.1 Construcción del sistema de calefacción

Los materiales empleados para la construcción del sistema de calefacción se muestran y describen en la **tabla 1**. La construcción comenzó adquiriendo una placa de calefacción HBP (Heated build Platform) de impresora 3D. Se puentearon las entradas 2 y 3 de la placa. Después, ésta se atornilló a la base de madera colocando 4 muelles, uno en cada esquina, con el fin de evitar el contacto directo entre la cama caliente y la base de madera. Para el control de temperatura, se probaron dos formas diferentes:

- En un primer caso, el control de la temperatura se realizó con ayuda de un termistor adherido a la placa HBP, una resistencia de 100 k Ω y una placa de proyectos Arduino conectados como indica el diagrama del **anexo B-3**. Las conexiones se realizaron en una *miniprotoboard* montada en una de las caras laterales de la base de madera. El termistor se calibró con ayuda de un multímetro con medición de temperatura.
- En el segundo caso, el control de temperatura se logró por medio de un termostato comercial (**tabla 1**); se sustituyó el relevador del termostato por otro que presentara una conexión normalmente cerrada. El termostato modificado se montó en la parte lateral de la base de madera con ayuda de cuatro tornillos y las conexiones eléctricas se hicieron desde la salida del termostato hasta las entradas 1 y 2 de la placa HBP, y finalmente, se conectó la salida de 12 V de la fuente de poder a la entrada del termostato.

En el **anexo B-4** se muestra un diagrama de las conexiones eléctricas realizadas. En el **anexo C-1** se listan algunos enlaces de compra y en el **anexo C-2** se listan algunos precios en pesos mexicanos.

Tabla 1. Materiales utilizados para la construcción del sistema de calefacción.

| | |
|--|---|
| Placa de calefacción HBP (Heated Build Platform) | Son usadas en las impresoras 3D para filamentos que requieren temperaturas altas y consiste en una resistencia eléctrica dentro de una placa de aluminio El modelo utilizado es la "Standard 3D Printer 3 MM MK3". El voltaje de trabajo es adaptable a 12 y 24 V con una potencia de 45 W. |
| Fuente de alimentación | Se utilizó una fuente de poder de CPU (Central Unit of Computer) convencional con salidas de 3.3 V a 9 A, 5 V a 7.5 A, 12 V a 8.5 A y con una potencia máxima de 55 W. |
| Placa de desarrollo Arduino Uno | Placa de desarrollo de proyectos. |
| Termostato con termopar | Voltaje de entrada y salida de 12 V DC. Intervalo de control (-50 a 110°C) |
| Relevador | Genérico, voltaje máximo de entrada y salida 24 V a 10 A de corriente directa. |
| Termistor NTC | 100 kΩ |
| Resistencia | 100 kΩ |
| Base de madera | Base de madera 20 x 20 cm |
| Cables de cobre | Calibre 10 |
| Tornillos y tuercas | De 1.5 pulgadas |
| Muelles | Resortes de 1.5 cm |
| Refractario de cocina | De 20 cm x 20 cm de área y de profundidad de 10 cm. Las medidas dependen del tamaño de los frascos. |

5.2 Construcción de los reactores

Los materiales para la construcción de los reactores se presentan en la **tabla 2**. En el **anexo C-1** se listan algunos enlaces de compra y en el **anexo C-2** se listan algunos precios en pesos mexicanos.

Tabla 2. Materiales utilizados para la construcción de los biodigestores.

| | |
|---------------------------------------|---|
| Sensores de presión | Voltaje de trabajo 5 V, salida 0.5 a 5 V, intervalo de presión desde 0 a 1.2 MPa, temperatura de trabajo desde 0 a 85 °C. |
| Tuercas para cuerda fina y empaques | ¼ de pulgada |
| Placa de desarrollo Arduino uno | Placa de desarrollo de proyectos. Incluye cable USB de comunicación. |
| Raspberry Pi | Computadora económica para proyectos. |
| Monitor | Convencional con entrada HDMI |
| Frascos de vidrio con tapa hermética | 6 frascos de 120 mL y 6 frascos de 80 mL con tapa hermética de acero |
| Manguera | De silicona y de laboratorio para vacío |
| Conexiones neumáticas | Acoplables con la manguera de silicona |
| Conexiones para manguera | Acoplables con la manguera de vacío |
| Abrazaderas | Convencional, acoplable con la conexión y manguera de vacío |
| Tubos cónicos | 50 mL |
| Frascos para laboratorio autoclavable | Marca Corning de 80 mL |
| Cinta de aislar | |

Para la construcción de los biodigestores se probaron dos diferentes frascos para usarlos como reactores: frascos de vidrio tipo Gerber y frascos de laboratorio autoclavables marca Corning.

5.2.1 Reactor fabricado a partir de frascos de vidrio.

Con ayuda de un taladro se realizaron dos orificios de $\frac{1}{4}$ de pulgada con una separación de 1.5 cm en las tapas de los frascos de vidrio de 120 mL y un sólo orificio de $\frac{1}{4}$ de pulgada en el centro de las tapas de los frascos de 80 mL. El frasco de 120 mL hizo las veces de biodigestor mientras el frasco de 80 mL se utilizó como filtro de CO₂.

Para la unión entre el filtro y el digestor se probaron dos montajes diferentes:

1. En un método de montaje se soldaron acoples tanto en el único orificio hecho en las tapas de frascos de 80 mL como en uno de los dos orificios hechos en las tapas de 120 mL (**fig. 2a y 2b**).
2. En el segundo, se ajustaron por medio de una tuerca y un empaque las conexiones neumáticas rápidas tanto en el orificio de tapas de frascos de 80 mL, como en uno de los dos orificios de las tapas de 120 mL (**fig. 2c y 2d**).

Los sensores de presión se montaron ajustándolos al segundo orificio realizado en las tapas de frascos de 120 mL con ayuda de una tuerca de cuerda fina y un empaque. Los sensores ya instalados pueden observarse en las **figuras 2a y 2c**. La comunicación entre los frascos de 120 mL, que harán de digestor, y los frascos de 80 mL, que se usarán de filtro, se realizó por medio de una manguera que, para el caso del primer tipo de montaje consistió en una manguera de laboratorio para vacío y, para el segundo tipo de montaje, se usó una manguera de silicona. En la **figura 2** puede observarse las formas finales de ambos montajes.

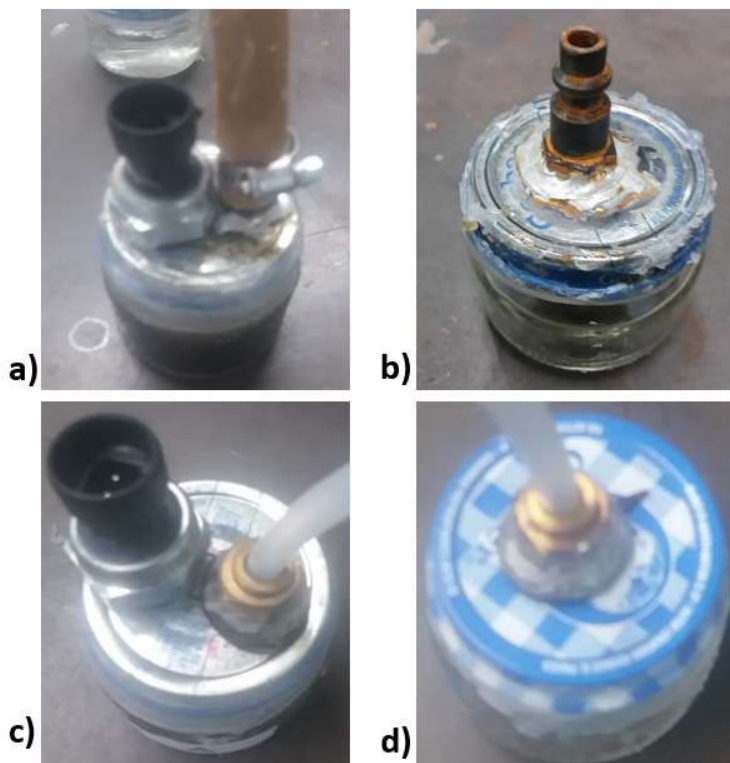


Figura 2. Forma final de los dos métodos de unión entre el filtro y el digestor construido a partir de frascos de vidrio tipo Gerber.

Las imágenes a) y b) muestran respectivamente al biodigestor y filtro correspondiente al primer montaje, donde el acople se une por soldadura. Las imágenes c) y d) muestran respectivamente al biodigestor y filtro del segundo montaje, donde el acople consiste en conexiones rápidas. Tanto en la imagen a) como en la c) se observa el sensor de presión montado sobre la tapa del frasco de 120 mL.

5.2.2 Construcción de reactores a partir de frascos de laboratorio autoclavables.

Se realizó un único orificio, con ayuda de un taladro, de $\frac{1}{4}$ de pulgada en el centro de las tapas de los frascos de laboratorio donde se ajustó el sensor de presión por medio de un empaque y una tuerca de cuerda fina. Posteriormente, se cortó un tubo cónico marca Corning de 50 mL justo en la medida de los 25 mL; después se procedió a realizar, con un taladro, 4 orificios de $\frac{1}{8}$ de pulgada a lo largo de la circunferencia del tubo a la altura de la medida de los 5 mL y un orificio de $\frac{1}{4}$ de pulgada a la altura de los 20 mL (**fig. 3**). En este sistema, el tubo cónico hará las veces de filtro y se localizará en el interior del frasco autoclavable, que funcionará como digestor, más adelante se harán precisiones sobre la forma en que se monta dicho sistema.



Figura 3. Sistema digester-filtro construido a partir de frasco de laboratorio.

A la izquierda se muestra un tubo cónico cortado con sus respectivos orificios. A la derecha se muestra el sensor de presión montado en la tapa del frasco de laboratorio autoclavable.

5.3 Conexión entre el sensor, tarjeta controladora y computadora

Cada sensor de presión consta de 3 cables de colores rojo, negro y amarillo. El cable color rojo, correspondiente a la alimentación, se conectó a la salida de la tarjeta programable Arduino de 5 V mientras que el cable negro se conectó a la toma de tierra de la tarjeta. El cable amarillo, correspondiente a la salida analógica, se conectó en una de las seis entradas analógicas de la placa Arduino. Cada salida analógica de cada sensor ocupa su propia entrada en la tarjeta de programación (**anexo 2-B**). Una vez realizada la conexión, la tarjeta de programación Arduino se conectó por medio de un cable USB a la Raspberry Pi, que hizo la función de una computadora ordinaria. A través del *software* libre Arduino, disponible en el hipervínculo mostrado en el **anexo C-1**, se consiguió la comunicación entre los sensores y la computadora.

5.4 Muestra y pretratamiento

Los desechos orgánicos utilizados para probar el equipo se recolectaron de diferentes establecimientos de comida procedentes de la ciudad de León, Guanajuato. Se almacenaron a -4 °C. Posteriormente, se secaron a 105 °C durante

72 horas, después se aplicó un proceso de trituración seguido de uno de molienda por medio de un mortero. La muestra se cribó con un colador seleccionando las partículas menores a 1 mm. Finalmente el sustrato se almacenó en un frasco hermético a temperatura ambiente hasta su uso.

5.5 Lodos anaerobios

Los lodos anaerobios que se usaron como inóculo se obtuvieron de un reactor anaerobio de flujo ascendente UASB (por sus siglas en inglés *Upflow anaerobic sludge Blanket*) ubicado en la planta de tratamiento de aguas residuales Pilgrim's Tepeji del Río. El agua tratada contiene desechos de un rastro de aves. La temperatura de trabajo del reactor es de 37 °C. Para la caracterización se determinaron los siguientes parámetros: pH, Sólidos Volátiles (SV), Sólidos Totales (ST) y alcalinidad para una muestra de 100 mL.

5.6 Metodologías de caracterización de los lodos anaerobios y el sustrato

5.6.1 Determinación de sólidos volátiles y sólidos totales.

La determinación fue adaptada de la Norma Oficial Mexicana NMX-AA-03m4-SCFI-2015. Tres crisoles se secaron en un horno a 95 °C durante 24 horas hasta alcanzar peso constante, se obtuvo así la “medición 1”. A cada crisol se le agregaron 8 g de muestra sólida (sustrato) o 25 mL de muestra líquida (inóculo) y se pesaron obteniéndose la “medición 2”. Posteriormente, las muestras se secaron a 95 °C durante 24 horas hasta alcanzar peso constante y se registraron los valores obteniendo así la “medición 3”. Finalmente, las muestras se calcinaron a 550 °C durante una hora y se registró el último peso correspondiente a la “medición 4”. Para el cálculo de los SV, ST, contenido de ceniza y porcentaje de humedad se emplearon las siguientes fórmulas:

$$SV \left[\frac{gSV}{gSustrato} \right] = \frac{Medición\ 3 - Medición\ 4}{Medición\ 2 - Medición\ 1} \quad \text{ecuación 1}$$

$$ST \left[\frac{gST}{gSustrato} \right] = \frac{Medición\ 2 - Medición\ 3}{Medición\ 2 - Medición\ 1} \quad \text{ecuación 2}$$

$$\text{Ceniza} \left[\frac{g_{\text{Ceniza}}}{g_{\text{Sustrato}}} \right] = \frac{\text{Medición 4} - \text{Medición 1}}{\text{Medición 2} - \text{Medición 1}} \quad \text{ecuación 3}$$

$$\% \text{ de humedad} = 100 (1 - ST) \quad \text{ecuación 4}$$

5.6.2 Determinación de la alcalinidad

Metodología empleada se basó en la Norma Oficial Mexicana NMX-AA-036-1980. Se valoró una muestra de 100 mL de inóculo con una solución normalizada de HCl, desde su pH original hasta un pH de 4.3. La alcalinidad se expresó en concentración de acetato equivalente y se calculó según la fórmula:

$$\left[CH_3COO^- \text{ equivalente} \right] = \frac{(mL \text{ usados en la valoración})(\text{concentración de HCl})}{\text{volumen de la muestra en mL}} \quad \text{ecuación 5}$$

5.6.3 Medición de los carbohidratos totales en disolución

Para la determinación se empleó la metodología descrita por Dubois et al. (1956). Se preparó una curva estándar, como se indica en la **tabla 3**, utilizando una solución patrón de glucosa de 1 mg/mL.

Tabla 3. Volumen de solución patrón de glucosa y volumen de agua por tubo para la realización de la curva patrón.

| Tubo | Solución patrón de glucosa [μL] | Agua [μL] |
|------|---------------------------------|-----------|
| 1 | 0 | 200 |
| 2 | 5 | 195 |
| 3 | 10 | 190 |
| 4 | 20 | 180 |
| 5 | 50 | 150 |
| 6 | 100 | 100 |
| 7 | 150 | 50 |

Tanto a la curva estándar como a las muestras se le añadieron 60 μL de una disolución de fenol al 80% (P/V) en etanol absoluto; posteriormente, se añadieron 500 μL de H₂SO₄ concentrado y se agitó en vórtex y se incubaron durante media hora a temperatura ambiente. Después, se tomaron 200 μL de cada tubo y se colocaron en una placa de 96 pozos. Finalmente, se midió la absorbancia a 450 nm con un espectrofotómetro. La concentración de carbohidratos en las muestras se determinó con base a la curva patrón que muestra la dependencia de la absorbancia con respecto a la concentración de glucosa (**figura 4**).

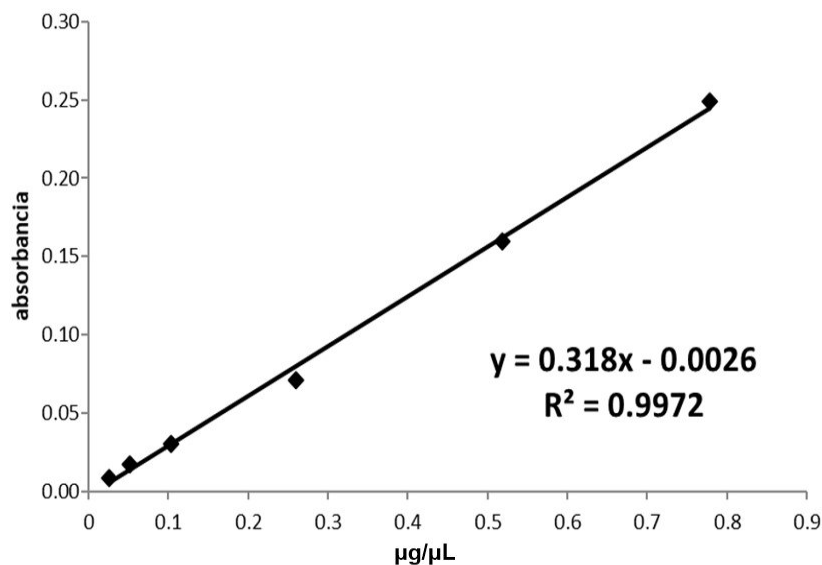


Figura 4. Curva patrón de concentración de glucosa contra absorbancia.

5.6.4. Determinación de la concentración de las proteínas totales en disolución

Para la determinación de la concentración las proteínas totales se utilizó el método descrito por Bradford (1976). Se preparó una curva estándar como se muestra en la **tabla 4**, utilizando una solución patrón de albúmina sérica bovina de una concentración de 1.48 mg/mL.

Tabla 4. Volumen de solución patrón de albúmina sérica bovina y volumen de agua por tubo para la realización de la curva patrón.

| Pozo | Solución patrón [µL] | Agua [µL] |
|------|----------------------|-----------|
| 1 | 0 | 12 |
| 2 | 1 | 11 |
| 3 | 2 | 10 |
| 4 | 4 | 8 |
| 5 | 8 | 4 |
| 6 | 12 | 0 |

Para cada punto de la curva se le agregaron 200 µL del reactivo de Bradford y se incubaron a temperatura ambiente durante 10 minutos. Finalmente, se midió la absorbancia a 595 nm con un espectrofotómetro. La concentración de proteínas se determinó empleando la curva patrón, que se muestra en la **figura 5**, donde se

observa la dependencia de la absorbancia con respecto a la concentración de albúmina sérica bovina.

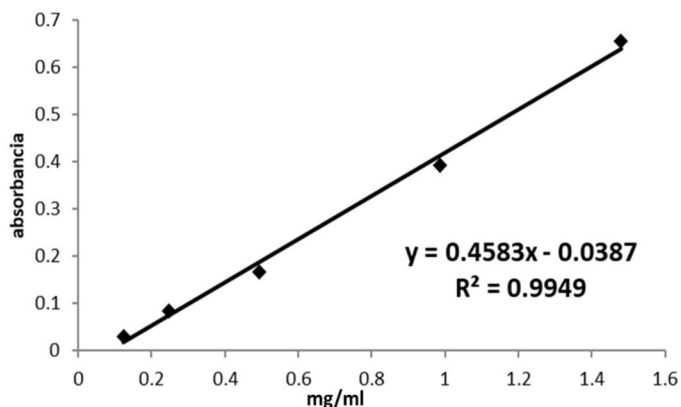


Figura 5. curva patrón de concentración de albúmina sérica bovina contra absorbancia.

5.6.5 Determinación de la cantidad de grasa

La determinación de la cantidad de grasa se basó en la Norma Oficial Mexicana NMX-F-089-S-1978. Un matraz bola con un agitador magnético en su interior y un dedal de extracción se secaron en un horno a 95 °C durante 24 horas hasta alcanzar peso constante. Se midieron los pesos de cada uno y se registraron como “matraz1” y “dedal1”, respectivamente. Al dedal de extracción se le agregaron 8 g de muestra y se registró su peso como “dedal2”. Haciendo uso de una parrilla con agitación magnética y un soporte universal, se montó un equipo de extracción soxhlet utilizando como disolvente 500 mL de éter etílico anhidro. La prueba se corrió a 105 °C con agitación constante y a una velocidad de un ciclo de descarga cada 15 minutos. La prueba se dio por finalizada al cumplirse 10 ciclos. Terminada la prueba se retiró el condensador y la cámara de extracción para permitir la evaporación del disolvente dentro del matraz. Finalmente, el matraz bola se llevó a un horno a 95 °C durante 24 horas y se registró su peso como “matraz2”. Se obtuvo el contenido de extracto etéreo de la muestra por gramo de muestra por medio de la siguiente fórmula:

$$\left[\frac{g \text{ extracto etereo}}{g \text{ muestra}} \right] = \frac{(\text{matraz2} - \text{matra })}{(\text{dedal2} - \text{dedal } 1)} \quad \text{ecuación 6}$$

5.6.6 Método de preparación del medio de cultivo

El medio de cultivo se preparó con base en las indicaciones propuestas por Angelidaki y Sanders (2004). Los pesos mostrados en la **tabla 5** son para preparar una solución a 10X.

Tabla 5. Compuestos y pesos usados para la preparación de 1L de medio de cultivo base, que para su uso deberá diluirse 1/10.

| Sustancia | Peso (g) |
|----------------------------------|----------|
| NH ₄ Cl | 100 |
| NaCl | 10 |
| MgCl ₂ | 10 |
| Na ₂ HPO ₃ | 180 |
| FeCl ₂ | 2 |
| HgBO ₃ | 0.05 |
| ZnCl ₂ | 0.05 |
| CuCl ₂ | 0.04 |
| MnCl ₂ | 0.05 |
| NaMoO ₄ | 0.05 |
| AlCl ₃ | 0.05 |
| CoCl ₂ | 0.05 |
| NiCl ₂ | 0.092 |
| EDTA | 0.05 |

Los compuestos se pesaron y se disolvieron en 500 mL de agua destilada. Se calentaron y agitaron hasta su disolución total. Se aforó hasta 1 L y se trasvasó a un frasco de laboratorio autoclaveable para su posterior esterilización. Se dejó enfriar y, en un entorno estéril generado por un mechero, se añadieron 8 pastillas con vitaminas marca Polibión. Se agitó y se almacenó a -4 °C hasta su uso.

5.7 Preparación de prueba de biodegradabilidad

5.7.1 Corrida en reactores hechos con frascos de vidrio y filtro de NaOH externo

Para la prueba de funcionalidad del prototipo se corrieron diferentes pruebas con cantidades variables de sustrato y diferentes modos de conexión entre el reactor y el filtro. A continuación, se describe un procedimiento general para correr cualquier prueba con el prototipo construido.

Se pesó la muestra de sustrato que se deseó probar en los frascos de vidrio de 120 mL, se agregaron 25 mL de inóculo, se aforó con medio de cultivo hasta los 80 mL y se introdujo al reactor un agitador magnético. Para cerrar el frasco, primero se

colocó cinta teflón en la rosca de los frascos y se cerraron con la tapa con el sensor previamente instalado y con una de las dos formas de conexión entre el reactor y el filtro (**sección 5.2.1**). Posteriormente, se utilizó silicón frío para sellar cada frasco y evitar fugas. Para el filtro, se agregaron 60 mL de una solución al 10 % de NaOH en los frascos de vidrio de 80 mL, se les colocó la cinta teflón, se taparon y se sellaron con silicón frío. Una vez cerrado el reactor y su filtro se conectaron entre sí conforme al tipo de conexión elegido: introduciendo la manguera de silicona en las conexiones rápidas o introduciendo las mangueras de vacío en los acoples y ajustándolos con una abrazadera.

Para el baño de calentamiento, se colocó el refractario, sobre la placa HBP y dentro, se colocaron los reactores dejando los filtros fuera del baño. Se agregó agua suficiente para cubrir la zona de reacción y se colocó el termopar del termostato. Posteriormente, los sensores se conectaron a la tarjeta de proyectos Arduino como se indicó en la **sección 5.3**.

Se conectó la Raspberry y en ella se ejecutó el *software* Arduino con el que se corrió el programa de medición (**anexo A-3**). Finalmente, se conectó la fuente de poder con las conexiones hechas a la placa HBP y se ajustó a la temperatura deseada en el termostato (**anexo B-4**). El procedimiento de instalación tanto del sistema operativo de la Raspberry como del *software* Arduino puede consultarse con precisión en los vínculos mostrados en la **tabla 1**. Las pruebas duraron de 200 a 600 horas según el desempeño del equipo y el desarrollo de la prueba.

5.7.2 Corridas con reactores con filtro de NaOH interno

Para esta prueba se utilizaron los mismos pasos iniciales que el punto anterior, se pesó la muestra de sustrato en los frascos de laboratorio autoclavables de 80 mL, se agregaron 25 mL de inóculo, se aforó con medio de cultivo hasta la marca de los 80 mL y se introdujo un agitador magnético. Posteriormente, a los tubos cónicos se les pegó cinta de aislar en el corte superior, de manera que el tubo embone en la boca del frasco autoclavable sin resbalar hacía el fondo (**fig. 6**). Una vez ajustado el filtro se añadió 1 g de NaOH y de tres a cinco gotas de agua, siempre cuidando que nada del NaOH pudiera caer a través de los orificios del filtro. Después, se cerró el reactor con su tapa unida a un sensor (**sección 5.2.2**). Se llevó al baño caliente

y, finalmente, se realizó la conexión de los sensores con la tarjeta Arduino descrita en la sección anterior.



Figura 6. Filtro interno para el reactor hecho a partir de un tubo cónico.

Se le colocó cinta de manera que pueda ajustarse en la boquilla del frasco sin resbalar hacia abajo.

6 Resultados y discusión

6.1 Construcción del prototipo

El dispositivo se construyó teniendo presente la importancia de obtener un prototipo barato y durable, ya que las pruebas de biodegradabilidad llegan a durar más de 30 días de uso continuo y, una falla tanto en el control de temperatura, en la medición de la presión o de la comunicación entre el sensor y la computadora durante la prueba generaría pérdidas de recursos y tiempo, al mismo tiempo que, el costo de las piezas no podía sobrepasar un valor razonable respecto a la función. En el **anexo C-2** se listan los precios de los componentes necesarios para la fabricación del prototipo y en la **sección 6.3** se compara el prototipo final contra dos equipos comerciales.

6.1.1 Calefacción

La primera parte de la fabricación del dispositivo fue la elaboración de la fuente de calefacción necesaria para el óptimo intervalo de temperatura para el crecimiento de los microorganismos, es decir, si en la prueba se evaluarían microorganismos mesófilos (25 °C a 40 °C) o termófilos (50 °C a 65 °C), no podían permitirse variaciones en la temperatura que pudieran ocasionar inhibición en el proceso de degradación.

Para lograr lo anterior se eligió una cama de calefacción para impresora 3D HBP (**tabla 1**), la cual se compone de una resistencia eléctrica dentro de una placa de aluminio. La cama presenta dos tipos de conexión de alimentación: 12 o 24 V; a una corriente de 6 A. Para el dispositivo se eligió la orientación de 12 V, la cual requiere el puenteo de las entradas 2 y 3 señaladas en la cama de calefacción. Es importante señalar que, para las conexiones eléctricas, no debían utilizarse partes plásticas que pudieran dañarse al estar expuestas a temperaturas altas por tiempos prolongados, pues se correría riesgo de incendio. Para las conexiones se optó por soldar directamente las partes. La fuente de poder utilizada para alimentar la cama

de calefacción fue una extraída de un CPU en desuso. La fuente puede suministrar 3, 5 y 12 V con una potencia máxima de 55 W.

Para el control de la temperatura se probaron dos sistemas diferentes:

1. En el primero se utilizó un termistor NTC (por sus siglas en inglés *Negative Temperature Coefficient*) de 100 k Ω , una resistencia de 100 k Ω , un módulo de un relevador a 12 V y una tarjeta controladora Arduino. Se armó como se muestra en el **anexo B-3** y se programó en el *software* Arduino para su funcionamiento (**anexo A-3**). El funcionamiento básico consiste en que un termistor NTC disminuye su resistencia a medida que la temperatura cambia, eso es interpretado por el Arduino como un interruptor; el Arduino une el circuito del relevador cuando la temperatura de la placa es baja y lo desconecta cuando la temperatura es alta. Este funcionamiento permitió controlar la temperatura. La calibración se realizó con un termopar y un multímetro.
2. Para el segundo método se facilitó el procedimiento adquiriendo un termostato genérico (**tabla 1**), pero el funcionamiento de éste era contrario al requerido, encendía a temperatura alta y apagaba a temperaturas bajas. El problema se resolvió desoldando el relevador (**fig. 7**) y puenteando otro en la conexión normalmente cerrada, de esa forma se obtuvo el funcionamiento deseado. Cabe mencionar que en el mercado se pueden conseguir termostatos que hagan la función deseada sin necesidad de cambiar el relevador, sin embargo, para este prototipo se adquirió éste por ser económico.

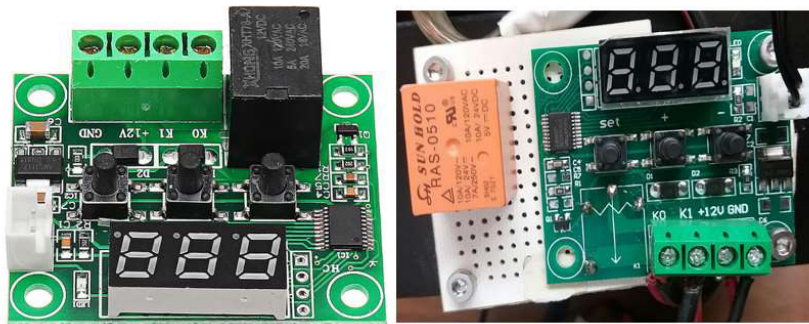


Figura 7. Termostato utilizado para el control de la temperatura.

A la izquierda se muestra el termostato con su relevador por defecto. A la derecha se observa el termostato después del puenteo.

Ambos métodos permitieron el correcto funcionamiento del sistema de calentamiento a un costo no mayor a \$ 300 pesos mexicanos, pero es el segundo método el que se considera superior por no necesitar calibración, mejor control de temperatura, más sencillo de montar, más económico y, al no requerir tarjeta controladora, su costo no supera los \$ 100 pesos. Además, incluye un termopar que permite medir directamente la temperatura del baño de calentamiento mientras que el primero, al registrar sólo la temperatura de la placa HBP, requiere un termómetro adicional para monitorear la temperatura del baño.

6.1.2 Sensores de presión

La selección del sensor de presión fue crítica en la fabricación del prototipo, ya que éstos debían ser de montaje sencillo y lo suficientemente robustos para soportar largas corridas bajo las condiciones de digestión. Se probaron varios sensores comerciales y económicos, pero, la mayoría fallaron ya sea por el tipo de comunicación con la computadora o por su incapacidad para soportar el ambiente húmedo y corrosivo en el interior del reactor. Sin embargo, se encontró un sensor relativamente económico suficientemente robusto y de fácil conexión e instalación (**fig. 8**). El modelo y donde adquirirlo se encuentran en la **tabla 1**.



Figura 8. Sensor de presión, empaque y tuerca.

La tarea que realiza el sensor de presión consiste en modificar el valor de una resistencia interna en función de la presión, dando como consecuencia un valor de voltaje de salida dependiente de la presión que va desde 0 a 5 V. Al usar el *software* y *hardware* Arduino, este intervalo de voltaje generado por el sensor es convertido a un valor serial que va desde 0 a 1023 unidades. Podría argumentarse que no existe una relación lineal entre la presión y el valor de la resistencia en el sensor, por lo que debería existir un método que linealizara tal respuesta, sin embargo, para facilitar el montaje y la construcción del prototipo se optó por una comprobación experimental de dicha suposición en el intervalo de presión en el que actúa el sensor. Para lo anterior, se utilizó una prueba donde se comparó la respuesta digital del sensor con la respuesta analógica de un baumanómetro, obteniéndose que cada unidad del valor serial equivalía a 5 mmHg de presión aproximadamente. A lo largo del trabajo se mostrarán resultados con el valor serial obtenido en bruto, de 0 a 1023, ya que un valor en unidades de presión no es necesario por el momento. Durante las primeras corridas con el prototipo, se programó el dispositivo para evaluar la presión dentro de los reactores una vez cada hora, durante todo el tiempo que funcionaba la prueba. Los resultados fueron curvas con un nivel alto de ruido (**fig. 9**), por lo que se procedió a mejorar el programa para hacer que el prototipo evaluara la presión cada minuto y que reportara el valor promedio de la variable respuesta en periodos de una hora, el código del programa puede ser consultado en el **anexo A-2**.

En la **figura 9** se presenta la comparación entre la medición puntual del valor serial obtenido cada hora, en gris y marcador triangular, y en la medición promedio cada hora medida cada minuto, en negro y marcador circular. En ambos casos la

medición corresponde a una prueba negativa, realizada con sustrato esterilizado sin inóculo, por lo que la variable respuesta debía permanecer constante.

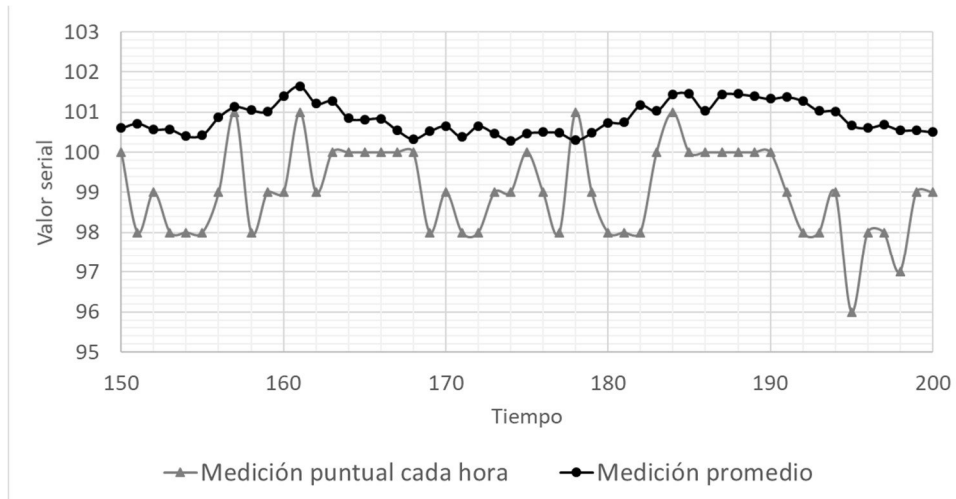


Figura 9. Comparación entre dos curvas representativas.

En gris: la medición puntual de la presión cada hora. En negro: la medición promedio de las evaluaciones de presión puntuales cada minuto por un lapso de una hora. Puede observarse el mayor nivel de ruido cuando sólo se evalúa la presión una vez cada hora.

Además, al analizar las **figuras 10 y 11** de variabilidad, normalizadas respecto al promedio de datos, puede observarse de forma más clara como la desviación de los datos es mucho menor utilizando el segundo programa, aquel que reporta valores promedio de las mediciones por cada minuto. También se aprecia que los datos obtenidos del primer programa presentan un alto valor de ruido con una alta variabilidad; mientras que en los segundos puede observarse una tendencia oscilante de bajas y altas presiones, dicho comportamiento puede estar influenciado a los intervalos de calentamiento y enfriamiento generados por el termostato en la regulación de la temperatura y a las razones de absorción de CO_2 en el filtro y disolución con el medio. Por lo anterior, se acepta que la medición constante cada minuto y promedio en intervalos de una hora permite obtener curvas con menor nivel de ruido y mayor sensibilidad (**fig. 10 y 11**).

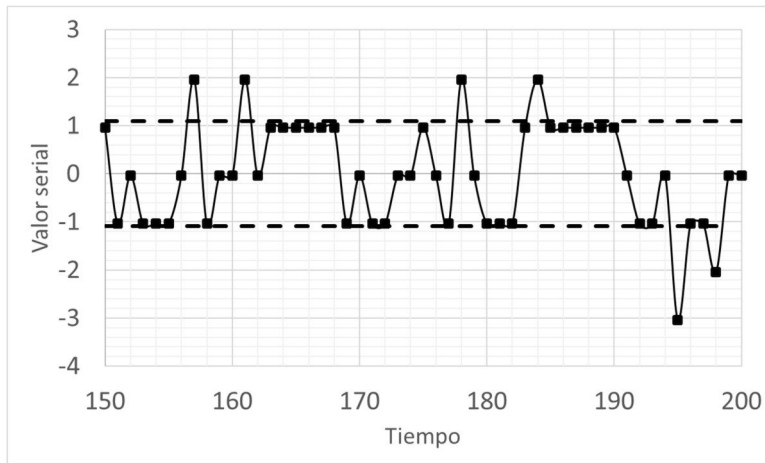


Figura 10. Variabilidad de las mediciones normalizadas respecto a los valores promedio evaluadas cada hora.

Curva representativa generada con los datos correspondientes a la medición puntual cada hora.

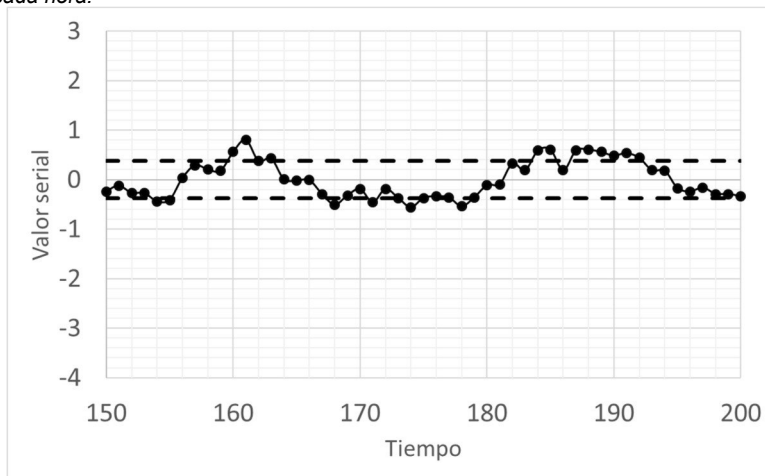


Figura 11. Variabilidad de las mediciones normalizadas respecto a los valores promedio evaluados cada minuto.

Curva representativa generada con datos correspondientes a los valores promedio medidos cada minuto por el lapso de una hora.

6.1.3 Ubicación de los filtros de NaOH

Los filtros de NaOH usados en el prototipo absorben el CO₂ generado dentro del biodigestor, lo que sugiere que las variaciones de presión se deben principalmente a la generación de CH₄. Para el prototipo se probaron dos ubicaciones del filtro de NaOH, una dentro del biodigestor y otra externa conectando el reactor con el filtro por medio de una manguera. De esta última ubicación, la externa, se probaron dos diferentes métodos de conexión: 1) conexiones simples acoplables a una manguera

de laboratorio para vacío ajustada con una abrazadera (**fig. 12a**) y 2) conexiones neumáticas rápidas acoplables a una manguera de silicona (**fig. 12b**)

Si bien ambas formas de conexión entre reactor y el filtro presentaron un correcto funcionamiento, también es cierto que existió una sutil diferencia en la facilidad de montaje del equipo, las conexiones neumáticas rápidas presentaron más facilidad en su montaje, sin embargo, en cuestión de precio las conexiones rápidas son mucho más costosas que los acoples sencillos por lo que la facilidad del montaje obtenida al usar acoples neumáticos puede llegar a ser irrelevante cuando se disponga de recursos limitados. Respecto al uso de frascos de vidrio tipo gerber como reactor presentó el inconveniente de que: los frascos están diseñados para soportar presiones negativas, pero durante la prueba de biodegradabilidad se requiere que soporten presiones positivas. Lo anterior ocasiona que en muchos casos el sello de silicón no sea suficiente para evitar fugas. Este problema es agravado si durante la instalación de los sensores y acoples la tapa de acero se deforma, pues dificulta el ajuste con el frasco incrementando la posibilidad de fuga. Pese a estos inconvenientes es posible obtener resultados adecuados para el análisis siempre que se tomen precauciones que garanticen el correcto sellado. En la **figura 12** se muestran las dos diferentes formas de conectar el reactor con el filtro en sistemas totalmente armados.

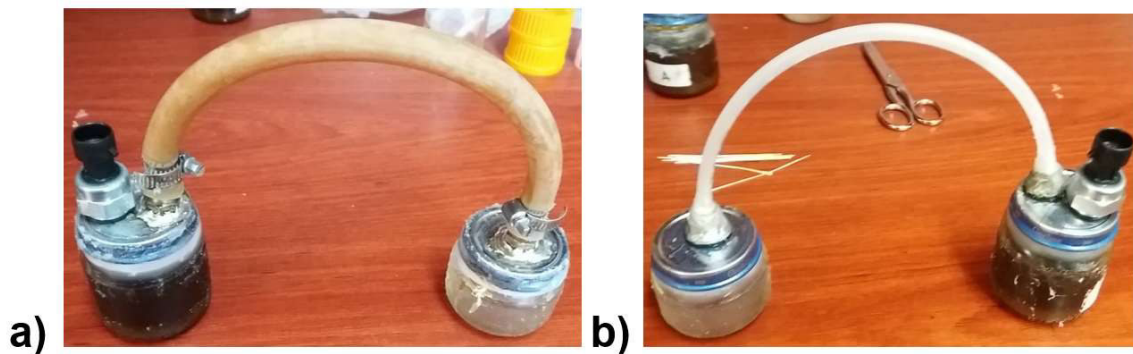


Figura 12. Reactores de biodigestión.

En el inciso a) se muestra la conexión entre el reactor y el filtro por medio de una manguera para vacío sujeta con abrazaderas a acoples soldados a la tapa del frasco y en el inciso b) se muestra el mismo tipo de conexión, pero por medio de conexiones rápidas.

La segunda forma de ubicar el filtro de NaOH consistió en colocarlo dentro del reactor, esto se logró haciendo embonar la sección inferior de un tubo cónico de 50

mL en la boquilla de un frasco de laboratorio, la holgura entre el tubo y la boca del frasco se cerró con cinta de aislar (**sección 5.7.2**). Esta última ubicación demostró ser mejor en comparación a la anterior, pues facilitó la manipulación y la preparación de pruebas y no fue necesario el uso de mangueras. Los frascos de laboratorio son más costosos que un frasco de vidrio tipo Gerber (**anexo C-2**), pero dicha diferencia pasa a segundo plano al considerar las ventajas en la operación como el cerrado hermético del frasco y la facilidad del transporte e instalación.

En la **figura 13** pueden observarse dos corridas donde se utilizaron posiciones del filtro internas y externas; puede notarse la complejidad del montaje de las pruebas donde el filtro es externo (**fig. 13a**). Por otro lado, el uso de filtros internos (**fig. 13b**) mejora la sensibilidad del equipo, ya que se disminuye el volumen de cabeza permitiendo que se genere mayor presión dentro del reactor con la misma cantidad de sustrato.

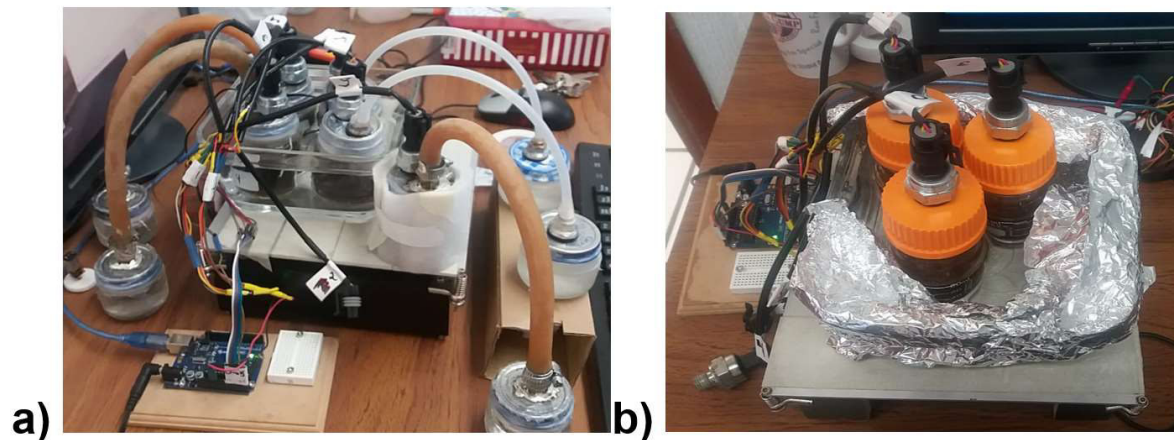


Figura 13. Corridas de biodegradabilidad.
a) montaje utilizando filtros externos y b) montaje utilizando filtros internos.

6.2 Prueba de biodegradabilidad

6.2.1 Inóculo

Como fuente del consorcio microbiano se utilizaron lodos anaerobios procedentes de un reactor UASB. Se caracterizaron siguiendo los procedimientos descritos en la **sección 5.5** y los resultados se presentan en la **tabla 6**.

Tabla 6. Características del inóculo.

| Lodo de un reactor anaerobio UASB | | |
|---|----------|------------|
| | Promedio | Desviación |
| pH | 6.89 | 0.03 |
| ST g/ml | 0.0130 | 0.0001 |
| SV g/ml | 0.0094 | 0.0001 |
| ceniza g/ml | 0.0036 | 0.00003 |
| SV/ST | 0.7236 | 0.0022 |
| Alcalinidad [CH ₃ COO ⁻ eq]/L | 0.0656 | 0.02 |

6.2.2 Sustrato

El prototipo se probó analizando la biodegradabilidad de residuos de comida de la ciudad de León Guanajuato, los cuales se colectaron y pretrataron como se indica en la **sección 5.4**. Una inspección visual de los desechos detectó que se componían principalmente de cascaras de vegetales comunes en la gastronomía de la región como jitomate, pepino, aguacate, zanahoria, lechuga, manzana, fresa, mango, limón, piña, entre otros; también se encontró una porción significativa de tortillas; en menor medida se encontró pan, y una cantidad baja de carne. Después del pretratamiento el sustrato presentó una coloración café (**fig. 14**). El pretratamiento es importante para evitar la saturación de los reactores durante la prueba, ya que se añade menos material al interior del reactor sin sacrificar los sólidos volátiles. En la **tabla 7** se pueden apreciar las características del sustrato antes y después del pretratamiento. Puede observarse que la cantidad de proteína es baja, lo que es consistente con la inspección visual del sustrato donde se observó poca carne. Es de resaltar, además, que la relación SV/ST se mantiene invariable durante el proceso, lo que nos indica la poca pérdida de sólidos volátiles durante el pretratamiento permitiendo que ingresen al reactor más cantidad de SV por unidad de masa, facilitando la agitación durante el proceso.

Tabla 7. Se muestra las características del sustrato antes y después del pretratamiento.

| | Sustrato Fresco | | Sustrato 72 h 105°C | |
|---------------------------------|-----------------|------------|---------------------|------------|
| | media | desviación | media | desviación |
| ST [g/g] | 0.257 | 0.003 | 0.9829 | 0.0001 |
| SV [g/g] | 0.211 | 0.007 | 0.8109 | 0.0084 |
| ceniza [g/g] | 0.045 | 0.004 | 0.1720 | 0.0085 |
| SV/ST | 0.823 | 0.018 | 0.8250 | 0.0086 |
| % humedad | 74.332 | 0.269 | 1.7095 | 0.0073 |
| Proteínas [mg/g] | * | * | 131.75 | 20.6 |
| Carbohidratos [g/g de sustrato] | * | * | 0.681 | 0.044 |
| % de lípidos | 0.95 | 0.10 | 3.5 | 0.10 |

* No se realizaron pruebas para carbohidratos y proteínas del sustrato fresco ya que se consideró poco representativa debido a lo heterogéneo del sustrato y a la dificultad de la trituración en húmedo.

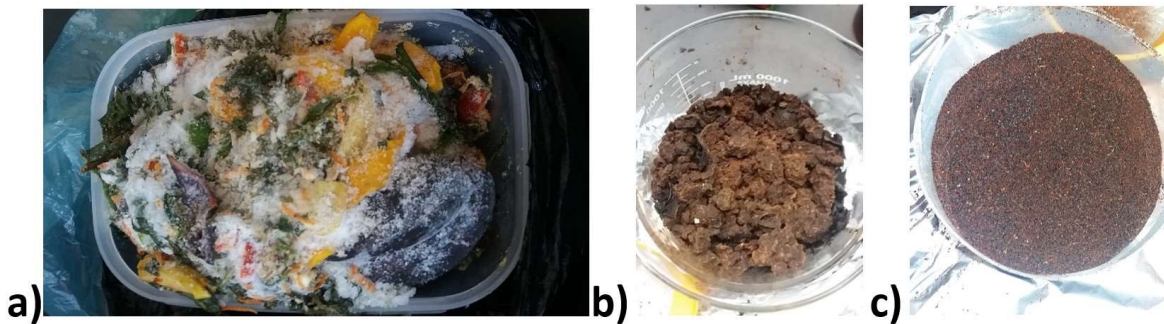


Figura 14. Diferentes etapas del sustrato a través del pretratamiento.

a) el sustrato almacenado a -4°C; b) después del secado por 72h a 95°C y c) pasado el proceso de molienda.

6.2.3 Biodegradabilidad del sustrato

Después de haber corrido varias pruebas preliminares, con el objeto de conocer si el equipo era capaz de resistir los tiempos de operación largos y sabiendo que los arreglos con filtro de NaOH interno presentaban los mejores resultados. Se procedió a realizar una prueba de biodegradabilidad con sustrato descrito. Para dicha prueba se realizaron cuatro corridas bajo las condiciones mostradas en la **tabla 8**. Las pruebas se realizaron siguiendo el arreglo de filtro interno por medio de frascos de laboratorio; evaluando la presión cada minuto para después presentar el valor serial promedio cada hora; con agitación intermitente, dos veces al día, y a una temperatura de 38 °C +/-1 °C.

Tabla 8. Se presentan las diferentes condiciones a las que se corrieron las pruebas de biodegradabilidad.

| Prueba | Sustrato | Inóculo | Filtro |
|-----------------------------------|----------|--|------------|
| 1 | 1 g | 25 mL | interno |
| 2 | | | sin filtro |
| 3 | 0 g | | interno |
| 4 | | | sin filtro |
| medio agitación temperatura | | aforo hasta 80 mL intermitente, 2 veces por día 38 °C +/- 1 °C | |

En la **figura 15** podemos observar tres curvas ilustrativas correspondientes a las pruebas 1, 2, 3; todas ellas se corrieron con el mismo medio, el mismo patrón de agitación y la misma temperatura (**tabla 8**). La prueba 1, correspondiente a la línea discontinua, presentó un valor de presión intermedio entre la prueba 2 y 3, debe recordarse que el valor serial depende del valor de la resistencia dentro del sensor, y ésta a su vez de la presión dentro del reactor; aproximadamente cada unidad de valor serial equivale a 5 mmHg (**sección 6.1.2**); por tal motivo se dice que a mayor valor serial mayor presión generada en el interior del reactor. La diferencia de presión observada entre la prueba 1 y 2 se debe al único parámetro que las distingue, que es el filtro. La prueba 2, al no contener filtro, presenta una mayor presión producto de todos los gases generados durante la biodigestión, incluido el CO₂. Por otro lado, la prueba 1 al contener el filtro de NaOH, gran cantidad del CO₂ generado es eliminado dando como resultado un valor serial correspondiente a la presión generada por gases diferentes al CO₂. Por tal motivo es razonable suponer que la prueba 2 dio como resultado una presión positiva que corresponde a gases generados bajo condiciones anaerobias con altas posibilidades de ser CH₄.

Lo ocurrido en la prueba 1 es muy similar a la prueba 3, ambas presentaron filtro, pero con la diferencia de que la prueba 3 únicamente contenía inóculo, por tal motivo dentro del reactor no hay una fuente de carbono suficiente para alcanzar los niveles de presión de la prueba 1, sin embargo, se observa un aumento de valor serial que indica un aumento en la presión que equivaldría a una pequeña generación de

biogás que tentativamente contendría CH₄; cabe señalar que esta suposición debe ser comprobada a través del análisis del gas por cromatografía de gases, con el fin de determinar de forma precisa la presión parcial del CH₄ al interior del biodigestor.

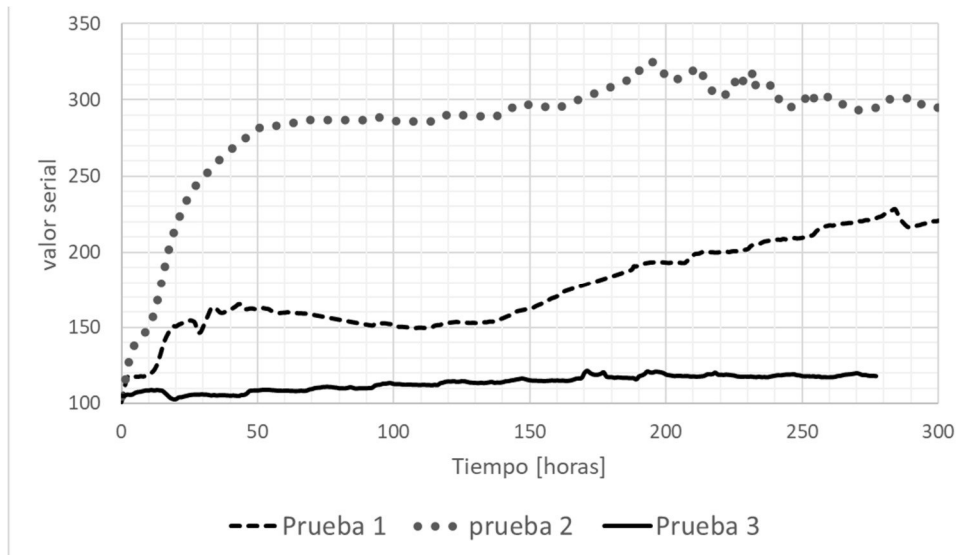


Figura 15. Curvas representativas de tres corridas que muestran los resultados de las pruebas de degradabilidad.

Prueba 1: 1g sustrato y 25mL de inóculo sin filtro; prueba 2: 1g sustrato y 25mL de inóculo con filtro; prueba 3: 25mL de inóculo sin filtro y sin sustrato.

Sí se comparan los resultados entre las pruebas 3, línea continua, y 4, línea punteada, mostrados en la **figura 16** puede observarse, primeramente, la gran cantidad de ruido que presenta la prueba 4, cuya causa se desconoce. Se logró observar que cuando las corridas consistían en 4 o más pruebas simultaneas una de las curvas obtenida con el equipo presentaba alto nivel de ruido. Dicho comportamiento se intentó evitar en la medida de lo posible sólo realizando 3 corridas simultaneas por prueba. Las causas podrían deberse tal vez a la poca capacidad de corriente que posee la tarjeta Arduino, por lo que modificando el circuito eléctrico podría resolverse. Por lo pronto, ese problema lo mantendremos fuera de la discusión y lo dejaremos para futuras mejoras del prototipo. Pero pese al ruido observado en la prueba 4, cabe resaltar que la tendencia entre las curvas de ambas pruebas, 3 y 4, es similar. Lo anterior es congruente con el hecho de que el inóculo, por ser lodo de un biodigestor anaerobio, consiste en una microbiota especializada en la generación de CH₄, lo que explica que no se observe gran diferencia entre correr una prueba sólo con inóculo, con o sin filtro, ya que la

tendencia de la microbiota va a ser llevar siempre el proceso hacia la metanogénesis reduciendo así la presión parcial de CO₂ dentro el reactor.

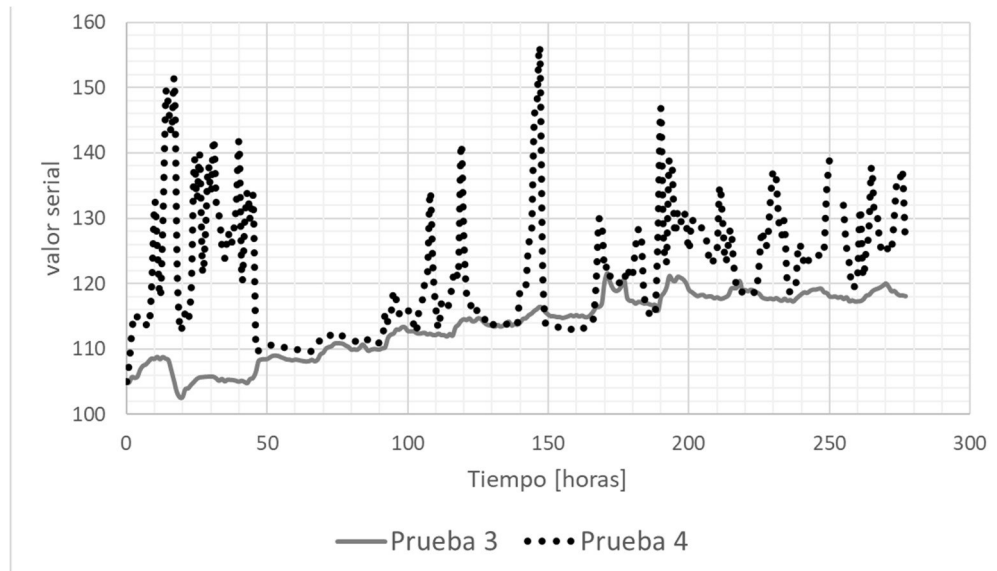


Figura 16. Resultados representativos de las pruebas 3 y 4 de biodegradabilidad.

Se observa una tendencia similar entre ambas gráficas pese al alto nivel de ruido de la prueba 4. Prueba 3: 25 mL de inóculo, sin sustrato, sin filtro; prueba 4: 25 mL de inóculo, sin sustrato, con filtro.

Los resultados mostrados también son consistentes con los resultados reportados en estudios de biodegradabilidad como los publicados por Campuzano y González-martínez (2015); Parra-Orobio et al. (2015); Elbeshbishy, Nakhla, y Hafez (2012); Cada uno de estos autores realizaron pruebas de biodegradabilidad con un equipo comercial diferente. Campuzano y González-martínez (2015) realizaron una prueba utilizando el equipo *AMPTS II*; Parra-Orobio et al. (2015) utilizaron el *System OxiTop® Control* y Elbeshbishy, Nakhla, y Hafez (2012) recurrieron a un sistema de viales conectados a una jeringa de marca *Perfek-tum*; en los tres casos, la composición química fue comprobada por cromatografía de gases. Es particularmente importante el caso de Parra-Orobio et al. (2015) que comprobó experimentalmente la relación entre la presión y la composición del biogás para un biodigestor anaerobio *System OxiTop® Control* que cuenta con un filtro interno de NaOH y un sensor digital de presión, por lo que este equipo es el más parecido de los tres al prototipo construido.

La tendencia de las curvas obtenidas y mostradas en las **figuras 15 y 16**, además de ser consistentes con las tendencias logarítmicas mostradas por Campuzano y

González-martínez (2015); Parra-Orobio et al. (2015); Elbeshbishy, Nakhla, y Hafez (2012); Son también compatibles con el modelo cinético propuesto por Hashimoto y Chen (1978) en donde a partir de una serie de pruebas con cantidades idénticas de sustrato, inóculo y medio de cultivo pero a diferentes tiempos de residencia, se pueden obtener parámetros cinéticos importantes como lo son: la razón de uso de sustrato volumétrico; la razón de crecimiento específico; la razón de crecimiento específico máxima; la constante K, que está relacionada con el crecimiento microbiano; el tiempo hidráulico de residencia y el tiempo hidráulico de residencia máximo; entre otras. Lo anterior, permite que los resultados obtenidos por el prototipo permitan una buena determinación de la biodegradabilidad equiparable a la que se obtendría al utilizar los equipos comerciales.

6.3 Costo del prototipo y su comparación respecto equipos comerciales.

El costo de fabricación del prototipo puede variar dependiendo la cantidad de equipo nuevo que se adquiriera para la construcción. En el **anexo C-2** se listan los intervalos de precio en el que los materiales y equipos pueden ser encontrados en el mercado. El costo de fabricación para el prototipo, considerando que todas las piezas son compradas nuevas, oscila entre los \$ 5300 y los \$ 8500 pesos mexicanos dependiendo el lugar donde se compre cada material o equipo. Sin embargo, el costo puede ser mucho menor si se reutilizan algunos materiales. Para el presente estudio los materiales reutilizados fueron: el monitor, la fuente de poder y la Raspberry, que puede ser sustituida por cualquier computadora de segunda mano o en desuso. De esa forma el costo final del prototipo no superó los \$ 3500 pesos.

En cuanto a los equipos comerciales diseñados para realizar pruebas de biodegradabilidad encontramos dos ya consolidados en el mercado: el *Automatic Methane Potential Test System* (AMPTS) en sus dos versiones AMPTS II y AMPTS II Light de la marca *Bioprocess* y el *System OxiTop®* Control de la marca WTW (*Wissenschaftlich-Technische-Werkstätten*). Ambos equipos son una respuesta a la dificultad que representa realizar grandes cantidades de pruebas de

biodegradabilidad. Su funcionamiento es similar, pero presentan conformaciones diferentes:

1) El equipo AMPTS II consiste en frascos de 500 mL conectados a un motor a pasos que realiza agitación mecánica, cuenta con un filtro de NaOH externo conectado al reactor por medio de una manguera, el control de temperatura se realiza a través de un baño de temperatura constante y la cuantificación de la cantidad de biogás se realiza por desplazamiento de agua. En su página oficial puede consultarse el manual de operación para más información sobre el funcionamiento del equipo.

2) El equipo *System OxiTop*® Control consiste en frascos de 500 mL, posee un filtro interno de NaOH, la agitación es magnética, por lo que incluye una base para la rotación de los imanes. No cuenta con un control de temperatura propio, sino que el conjunto de reactores se introduce junto con la base de agitación a una incubadora. La determinación de la cantidad de biogás se realiza a partir de la presión interna de cada reactor. Nuevamente, en la página oficial está disponible el manual de operación.

Por otra parte, el prototipo construido para este estudio cuenta con características de ambos modelos comerciales, el calentamiento se realiza por medio de un baño, la agitación es magnética pero intermitente, el filtro se colocó interno y la cantidad de biogás puede determinarse por medio de los datos de presión recabados por el sensor. La comunicación entre el sensor y la computadora se realiza a través del *hardware* y *software* Arduino, pero en nuevas versiones puede omitirse la tarjeta programadora y conectar los sensores directamente a la Raspberry Pi, adaptarse una base de agitación continua e incluso, podría establecerse una comunicación inalámbrica. Por supuesto, cada mejora trae consigo un incremento en el costo de construcción, pero aun seguiría representando una opción mucho más económica que cualquier opción comercial.

7 Conclusión

El prototipo construido puede emplearse para realizar pruebas de biodegradabilidad bajo condiciones anaerobias con resultados consistentes con los reportados en investigaciones hechas con equipos de biodegradabilidad comerciales. El costo del prototipo puede alcanzar hasta los \$ 8500 pesos mexicanos, sin embargo, puede reducirse hasta los \$ 3500 pesos reutilizando equipo de cómputo en desuso.

8 Perspectivas

1. Eliminación de la tarjeta de proyectos Arduino, y realizar la comunicación entre los sensores directamente hacia la Raspberry Pi. Lo cual podría eliminar el ruido generado al realizar más de 3 pruebas simultaneas.
2. Automatización del sistema de agitación.
3. Linealización de la señal de los sensores de presión.
4. Comprobar la composición química del biogás por medio de cromatografía de gases.
5. Desarrollar la transmisión de los datos de forma inalámbrica.

9 Bibliografía

- Angelidaki, I., L. Ellegaard, and B. K. Ahring. 1993. "A Mathematical Model for Dynamic Simulation of Anaerobic Digestion of Complex Substrates: Focusing on Ammonia Inhibition." *Biotechnology and Bioengineering Symposium* 42: 159–66.
- Angelidaki, I., and Wendy Sanders. 2004. "Assessment of the Anaerobic Biodegradability of Macropollutants." *Environmental Science and Bio/Technology* 3: 117–29.
- Angelidaki, I, M Alves, D Bolzonella, L Borzacconi, J L Campos, A J Guwy, S Kalyuzhnyi, P Jenicek, and J B Van Lier. 2009. "Defining the Biomethane Potential (BMP) of Solid Organic Wastes and Energy Crops : A Proposed Protocol for Batch Assays." *Water Science & Technology* 59 (5): 927–34. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.040>.
- Batstone, D., J. Keller, I. Angelidaki, S.V. Kalyuzhnyi, S.G. Pavlostathis, A. Rozzi, W.T.M. Sanders, H. Siegrist, and Vavilin V.A. 2002. "Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1) The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1)." *Water Science & Technology* 45 (10): 65–73.
- Beltrán, L., R. Alexandri, F. Cafaggi, S. Barrera, B. Hernandez, M. Guerrero, A. Rojas, et al. 2018. "Balance Nacional de Energía 2017." *Secretaría de Energía*.
- Bradford, Marion. 1976. "A Rapid and Sensitive Method for the Quantitation of Microgram Quantities of Protein Utilizing the Principle of Protein-Dye Binding." *Analytical Biochemistry* 72: 248–54.
- Cai, Mingwei, David Wilkins, Jiapeng Chen, Siu-kin Ng, Hongyuan Lu, Yangyang Jia, and Patrick K H Lee. 2016. "Metagenomic Reconstruction of Key Anaerobic Digestion Pathways in Municipal Sludge and Industrial Wastewater Biogas-Producing Systems." *Frontiers in Microbiology* 7 (778): 1–12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00778>.
- Campuzano, Rosalinda, and Simón González-Martínez. 2015. "Bioresource Technology Extraction of Soluble Substances from Organic Solid Municipal Waste to Increase Methane Production." *Bioresource Technology* 178: 247–53. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.08.042>.
- Castro-Alvarez, Fernando, Peter Marsters, Diego Ponce de León Barido, and Daniel M. Kammen. 2018. "Sustainability Lessons from Shale Development in the United States for Mexico and Other Emerging Unconventional Oil and Gas Developers." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82 (April 2016): 1320–32. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.082>.
- Chomsky, Noam. 2017. *Who Rules the World*. Edited by Picador. Second. USA.
- Coldwell, P., L. Beltrán, V. Áviles, E. Villanueva, L. Muñozcano, J. Mota, J. Rodriguez, et al. 2017. "Energías Limpias." *Dirección General de Energías Limpias* 3 (31).
- Cotabarren, Ivana M, Jonathan Moreno, Ana L Martínez, Fernanda A Cabrera, and Juliana Pi. 2019. "Valorization of Anaerobic Digestion Liquid Residue through the Production of Organic Fertilizer by Fluidized Bed Granulation." *Chemical Engineering Research and Design* 7: 113–21. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.04.043>.
- Dincer, Ibrahim. 2000. "Renewable Energy and Sustainable Development: A Crucial Review." *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 4 (2): 157–75. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(99\)00111-8](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(99)00111-8).
- Dubois, Michel, K. A. Gilles, J. K. Hamilton, P. A. Rebers, and Fred Smith. 1956. "Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances." *Analytical Chemistry* 28 (3): 350–56. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>.
- Elbeshbishy, Elsayed, George Nakhla, and Hisham Hafez. 2012. "Bioresource Technology Biochemical Methane Potential (BMP) of Food Waste and Primary Sludge : Influence of Inoculum Pre-Incubation and Inoculum Source." *Bioresource Technology* 110: 18–25. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.025>.
- Enerdata. 2019. "Global Energy Statistical Yearbook 2018." 2019. <https://yearbook.enerdata.net>.
- Etchevers, J D, C Prat, C Balbontín, M Bravo, M Martínez, J D Etchevers, C Prat, C Balbontín, M Bravo, and M Martínez Influence. 2006. "Influence of Land Use on Carbon Sequestration and Erosion in Mexico , a Review." *Agronomy for Sustainable Development* 26: 21–28. <https://doi.org/10.1051/agro>.
- González-gonzález, A, F Cuadros, A Ruiz-celma, and F López-rodríguez. 2013. "Energy-Environmental Benefits and Economic Feasibility of Anaerobic Codigestion of Iberian Pig Slaughterhouse and Tomato Industry Wastes in Extremadura (Spain)." *Biore Source Technology* 136: 109–16. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.02.031>.
- Hashimoto, Andrew., and Y Chen. 1978. "Kinetics of Methane Fermentation." *Biotechnology and Bioengineering Symposium*, no. April. <https://www.researchgate.net/publication/236522506>.
- Holdren, John P. 1991. "Population and the Energy Problem." *Population and Environment* 12 (3): 231–55. <https://doi.org/10.1007/BF01357916>.
- IEA. 2017. "World Energy Balances: Overview." International Energy Agency. 2017. <https://webstore.iea.org/world-energy-balances-2018>.
- Illoldi-rangel, Patricia, Miguel Linaje, Trevon Fuller, and Sahotra Sarkar. 2007. "The Cost of Postponing Biodiversity Conservation in Mexico." *Biological Conservation* 34: 593–600. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.08.028>.

- Jain, Sanjay, Anil K. Lala, Suresh K. Bhatia, and Arvind P. Kudchadker. 1992. "Modelling of Hydrolysis Controlled Anaerobic Digestion." *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 53 (4): 337–44. <https://doi.org/10.1002/jctb.280530404>.
- Kaza, Silpa, Lisa Yao, Perinaz Bhada-Tata, and Frank Van Woerden. 2019. *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington DC: World Bank Group. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>.
- Lauwers, Joost, Lise Appels, Ian P Thompson, Jan Degreève, Jan F Van Impe, and Raf Dewil. 2013. "Mathematical Modelling of Anaerobic Digestion of Biomass and Waste : Power and Limitations." *Progress in Energy and Combustion Science* 39: 383–402.
- Leng, Ling, Peixian Yang, Shubham Singh, Huichuan Zhuang, Linji Xu, and Wen-hsing Chen. 2018. "A Review on the Bioenergetics of Anaerobic Microbial Metabolism Close to the Thermodynamic Limits and Its Implications for Digestion Applications." *Bioresource Technology* 247: 1095–1106.
- Madigan, Michael, John Martinko, Kelly Bender, Daniel Buckley, and David Stahl. 2015. *Brock Biology of Microorganisms*. Fourteenth. United States: PEARSON.
- Mcinerney, M., and M. Bryant. 1981. "Basic Principles of Bioconversions in Anaerobic Digestion and Methanogenesis." In *Biomass Conversion Processes for Energy and Fuels*, edited by Samir Sofer and Oskar Zaborsky, 277–98. New York: Springer.
- Mcinerney, Michael J, Jessica R Sieber, and Robert P Gunsalus. 2009. "Syntrophy in Anaerobic Global Carbon Cycles." *Current Opinion in Biotechnology* 20: 623–32. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2009.10.001>.
- Morris, Brandon E L, Ruth Henneberger, Harald Huber, and Christine Moissl-eichinger. 2013. "Microbial Syntrophy: Interaction for the Common Good." *FEMS Microbiology Reviews* 37 (3): 384–406. <https://doi.org/10.1111/1574-6976.12019>.
- Obrador, Andrés Manuel López. 2019. "Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024." *Gobierno de México*. <https://www.ciapem.org/plan-nacional-de-desarrollo-2019-2024/>.
- ONU. 1997. "Protocolo de Kioto." *Convención Marco de Las Naciones Unidas Sobre El Cambio Climático*.
- . 2015. "Acuerdo de París." *Convención Marco de Las Naciones Unidas Sobre El Cambio Climático*.
- . 2016. "Agenda 2030 y Los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Una Oportunidad Para América Latina y El Caribe." *Comisión Económica Para América Latina y El Caribe*. www.cepal.org.
- Parra-Orobio, Vásquez-Franco, Torres-Lozada, Torres-López, Marmolejo-Rebellón, and Cárdenas-Cleves. 2015. "Efecto de La Relación Sustrato-Inóculo Sobre El Potencial Bioquímico de Metano de Biorresiduos de Origen Municipal." *Ingeniería Investigación y Tecnología* 16 (4): 515–26.
- Raposo, F, M A De Rubia, and R Borja. 2011. "Anaerobic Digestion of Solid Organic Substrates in Batch Mode : An Overview Relating to Methane Yields and Experimental Procedures." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (1): 861–77. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.008>.
- Schink, Bernhard. 1997. "Energetics of Syntrophic Cooperation in Methanogenic Degradation." *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. 61 (2): 262–80.
- Semarnat. 2015. "Informe de La Situación Del Medio Ambiente En México." *Secretaría Del Medio Ambiente y Recursos Naturales*.
- . 2016. "Revisión y Actualización Del Potencial de Biomasa Para Generación de Energía Eléctrica a Partir de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Presentado En El Inventario Nacional de Energías Renovables (INERE)." Mexico. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/261712/2017_1303_INFORME_FINAL_IMTA-SENER.pdf.
- . 2019. "Visión Nacional Hacia Una Gestión Sustentable: Cero Residuos." *Secretaría Del Medio Ambiente y Recursos Naturales*. <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/vision-nacional-hacia-una-gestion-sustentable-189541?idiom=es>.
- Shim, Jae-goo, Dong Woog Lee, Ji Hyun Lee, and No-sang Kwak. 2016. "Experimental Study on Capture of Carbon Dioxide and Production of Sodium Bicarbonate from Sodium Hydroxide." *Environmental Engineering Research* 21 (3): 297–303.
- Uçkun, Esra, Antoine P Trzcinski, Wun Jern, and Yu Liu. 2014. "Bioconversion of Food Waste to Energy : A Review." *Fuel* 134: 389–99.
- Vavilin, V. A., B. Fernandez, J. Palatsi, and X. Flotats. 2008. "Hydrolysis Kinetics in Anaerobic Degradation of Particulate Organic Material: An Overview." *Waste Management* 28 (6): 939–51. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.03.028>.
- Venkiteshwaran, Kaushik, Benjamin Bocher, James Maki, and Daniel Zitomer. 2015. "Relating Anaerobic Digestion Microbial Community and Process Function." *Microbiology Insights* 8 (2): 37–44. <https://doi.org/10.4137/MBI.S33593.TYPE>.

Anexos A

Códigos usados para el control de los sensores.

A-1 Evaluación puntual de la presión cada hora.

```
int sensor0;
int sensor1;
int sensor2;
int sensor3;
int sensor4;
int sensor5;
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Serial.print("sensor 0");
  Serial.print(" ");
  Serial.print("sensor 1");
  Serial.print(" ");
  Serial.print("sensor 2");
  Serial.print(" ");
  Serial.print("sensor 3");
  Serial.print(" ");
  Serial.print("sensor 4");
  Serial.print(" ");
  Serial.print("sensor 5");
  Serial.println(" ");
}

void loop()
{
  sensor0=analogRead(A0);
  sensor1=analogRead(A1);
  sensor2=analogRead(A2);
  sensor3=analogRead(A3);
  sensor4=analogRead(A4);
  sensor5=analogRead(A5);
  Serial.print(sensor0);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(sensor1);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(sensor2);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(sensor3);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(sensor4);
  Serial.print(" ");
  Serial.println(sensor5);
  delay(3600000);
}
```

A-2 Evaluación puntual de la presión cada minuto generando un promedio por hora.

```
#define temp 60 // temporizador
#define lapso 60000 // espera de un minuto
int k=0; // contador
int lecturaA[temp];
int lecturaB[temp];
int lecturaC[temp];
int lecturaD[temp];
int lecturaE[temp]; //almacenan valor
analógico para cada sensor
double sumlecturaA;
double sumlecturaB;
double sumlecturaC;
double sumlecturaD;
double sumlecturaE; //almacenan suma de
valores analógicos de cada sensor
double promlecturaA;
double promlecturaB;
double promlecturaC;
double promlecturaD;
double promlecturaE; // almacena el promedio de
los valores analógicos
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Serial.print("tiempo");
  Serial.print(" ");
  Serial.print("sensor A");
  Serial.print(" ");
  Serial.print("sensor B");
  Serial.print(" ");
  Serial.print("sensor C");
  Serial.print(" ");
  Serial.print("sensor D");
  Serial.print(" ");
  Serial.print("sensor E");
  Serial.println(" ");
  Serial.println(" ");
  Serial.print(k);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(analogRead(A0));
  Serial.print(" ");
  Serial.print(analogRead(A1));
  Serial.print(" ");
  Serial.print(analogRead(A3));
  Serial.print(" ");
  Serial.print(analogRead(A4));
  Serial.print(" ");
  Serial.print(analogRead(A5));
  Serial.println(" ");
}
void loop()
{
  //CONTEO DE TIEMPO EN HORAS
  k=k+1;
  // MEDICIÓN EN SENSORES
  sumlecturaA=0;
  sumlecturaB=0;
  sumlecturaC=0;
  sumlecturaD=0;
  sumlecturaE=0; //
  INICIALIZANDO VARIABLES DE LECTURA
  for(int i=0;i<temp;i++)
  {
    lecturaA[i]=analogRead(A0);
    lecturaB[i]=analogRead(A1);
    lecturaC[i]=analogRead(A3);
    lecturaD[i]=analogRead(A4);
    lecturaE[i]=analogRead(A5); //
  }
  ASIGNACIÓN DE VALOR ANALÓGICO
  sumlecturaA=lecturaA[i] +
  sumlecturaA;
```

```

sumlecturaB;      sumlecturaB=lecturaB[i] +      promlecturaE=sumlecturaE/temp;
//PROMEDIOS DE LECTURA POR HORA
sumlectura4;      sumlecturaC=lectura4[i] +      Serial.print(k);
Serial.print(" ");
sumlectura5;      sumlecturaD=lectura5[i] +      Serial.print(promlecturaA);
Serial.print(" ");
sumlectura6;      sumlecturaE=lectura6[i] +      Serial.print(promlecturaB);
Serial.print(" ");
//SUMA DE VALORES ANALOGICOS      Serial.print(promlecturaC);
delay(lapso);      Serial.print(" ");
}      Serial.print(promlecturaD);
// LO ANTERIOR OCURRE POR 60 SEGUNDOS      Serial.print(" ");
promlecturaA=sumlecturaA/temp;      Serial.println(promlecturaE);
promlecturaB=sumlecturaB/temp;
promlecturaC=sumlecturaC/temp;
promlecturaD=sumlecturaD/temp;
}

```

Códigos usados para el control de la placa de calentamiento

A-3 Método de control con termistor (método 1, sección 6.1.1)

```

//int maximo=230; //temperatura caliente
// Mantiene el agua de un matraz de 500 a una temperatura de 40-45 y
//int minimo=260;//temperatura fria
// y la de un tupper de vidrio grueso a 30-32 grados

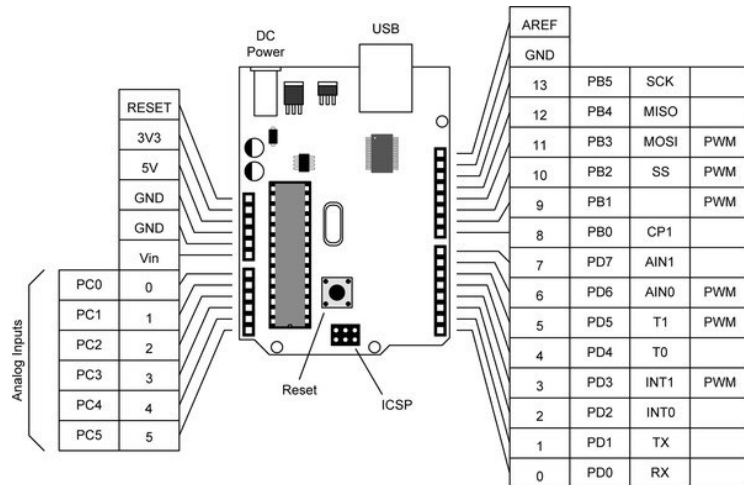
int maximo=290; //temperatura caliente (valor obtenido por calibración)
int minimo=300;//temperatura fría (valor obtenido por calibración)
int parrilla;
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode (13, OUTPUT);
}
void loop()
{
  parrilla = analogRead(A0);
  if(parrilla> minimo)
  {
    digitalWrite(13,LOW);
    Serial.print(parrilla);
    Serial.println(" calentando");
    delay (1000);
  }
  else if(parrilla<maximo)
  {
    digitalWrite (13,HIGH);
    Serial.print(parrilla);
    Serial.println(" enfriando");
    delay (1000);
  }
  else
  {
    Serial.print(parrilla);
    Serial.println(" en intervalo");
    delay(1000);
  }
}

```

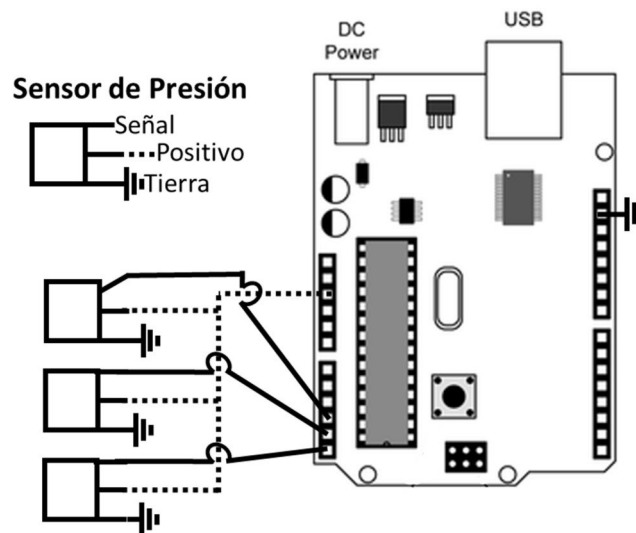
Anexos B

Esquemas electrónicos

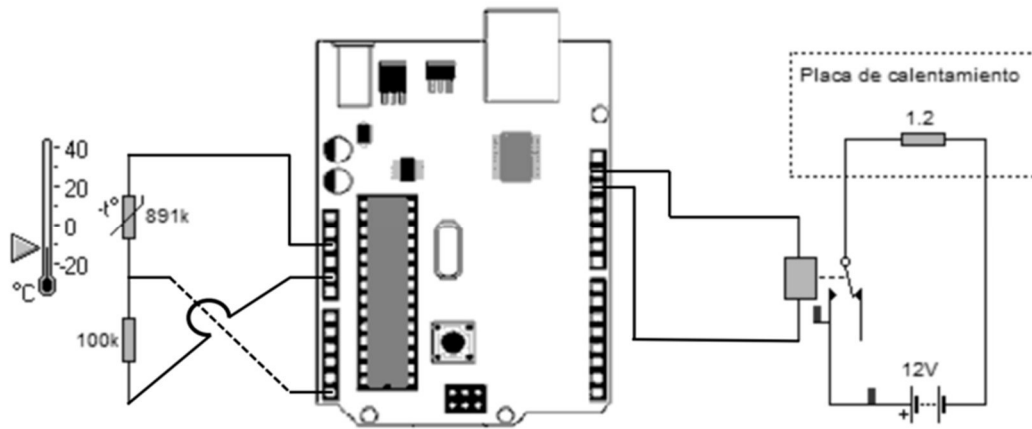
B-1 Esquema de entradas y salidas para un Arduino Uno



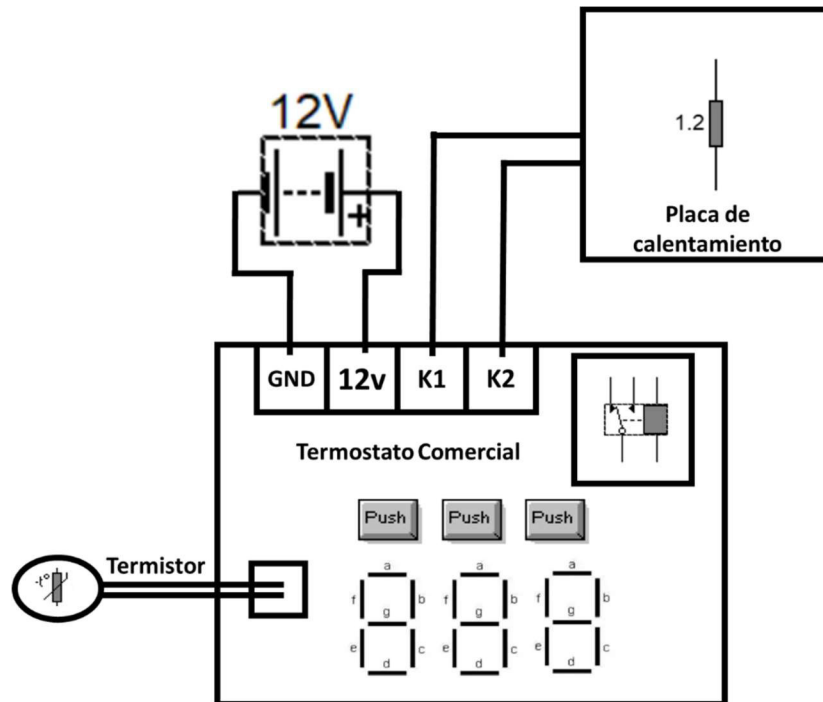
B-2 Esquema para las conexiones electrónicas de tres sensores de presión a un Arduino Uno



B-3 Esquema de las conexiones electrónicas para la regulación de temperatura de la placa de calefacción por medio de un termistor NTC (método 1, descrito en la sección 6.1.1)



B-4 Esquema de las conexiones electrónicas para la regulación de temperatura de la placa de calefacción por medio de un termostato comercial (método 2, descrito en la sección 6.1.1)



Anexos C

C-1 Tabla que muestra los hipervínculos de compra para algunos de los materiales usados para la construcción del prototipo.

| | |
|---|---|
| Placa de calefacción HBP (Heated Build Platform) | Liga de compra: https://www.banggood.com/Standard-3D-Printer-3MM-MK3-Aluminum-Board-PCB-Heat-Bed-For-Reprap-p-989030.html?rmmds=search&cur_warehouse=CN |
| Placa de desarrollo Arduino Uno | Liga de compra: https://www.arduino.cc/ |
| Termostato con termopar | Liga de compra: https://www.banggood.com/Geekcreit-W1209-DC-12V-50-to-110-Temperature-Sensor-Control-Switch-Thermostat-Thermometer-p-933303.html?rmmds=search&cur_warehouse=CN |
| Sensores de presión | Liga de compra: https://www.banggood.com/Pressure-Transducer-Sensor-Oil-Fuel-Diesel-Gas-Water-Air-Sensor-p-1007341.html?rmmds=search&cur_warehouse=CN |
| RaspBerry Pi | Liga de compra: https://www.raspberrypi.org/ |

C-2 Tabla que presenta la lista de materiales y equipo utilizado para la construcción del prototipo final.

| Lista de materiales y equipo | Intervalo de precio en pesos mexicanos por unidad | Unidades necesarias |
|---|--|----------------------------|
| Placa de calefacción HBP (Heated Build Platform) | 250 - 350 | 1 |
| Placa de desarrollo Arduino Uno | 100 - 150 | 1 |
| Termostato con termopar | 40 - 50 | 1 |
| Sensores de presión | 200 - 400 | 4 |
| RaspBerry Pi | 1500 - 2300 | 1 |
| Frasco de laboratorio autoclavable | 170 - 200 | 3 |
| Tuercas para cuerda fina | 80 - 100 | 3 |
| Base de madera | 20 - 50 | 1 |
| Paquete de 4 tornillos y muelles de nivel | 50 - 80 | 1 |
| Refractario de cocina | 300 - 450 | 1 |
| Tubos cónicos para centrífuga | 10 - 20 | 3 |
| Cinta de aislar | 10 - 12 | 1 |
| Fuente de poder | 300 - 500 | 1 |
| Monitor | 1500 - 2000 | 1 |
| Costo del prototipo | 5310 - 8462 | |



León Guanajuato a 14 de enero de 2020

Dr. David Yves Ghislain Delepine
Director de la División de Ciencias e Ingenierías, Campus León
Universidad de Guanajuato

PRESENTE

Por medio de la presente le comunico que he revisado la tesis titulada “Construcción de un prototipo económico para la evaluación de la biodegradabilidad de materia orgánica bajo condiciones anaerobias”, que presentó el Ingeniero Químico Metalúrgico **Jorge Adrián Botello Rueda (NUA:338753)**, estudiante de la Maestría en Ciencias Aplicadas de la Universidad de Guanajuato. Derivado de esta revisión otorgo mi voto **aprobatorio** para que el Ing. Botello Rueda lleve a cabo la defensa de su trabajo de tesis a fin de obtener su grado de Maestro en Ciencias Aplicadas.

Sin más por el momento, le envió un cordial saludo.

“La verdad os hará libres”

Atentamente,

Una firma manuscrita en azul que parece decir 'Argelia Rosillo de la Torre'.

Dra. Argelia Rosillo de la Torre.

Profesor Asociado C
Departamento de Ingenierías Química, Electrónica y Biomédica.
División de Ciencias e Ingenierías.
Universidad de Guanajuato, Campus León.



León, Gto a 21 de enero de 2020

Dr. David Yves Ghislain Delepine

Director de la División de Ciencias e Ingenierías, Campus León

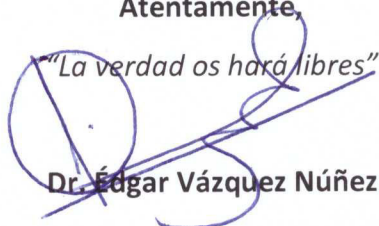
Universidad de Guanajuato

PRESENTE

Por medio de la presente le comunico que he revisado la tesis titulada **“Construcción de un prototipo económico para la evaluación de la biodegradabilidad de materia orgánica bajo condiciones anaerobias”**, que presentó el Ingeniero Químico Metalúrgico **Jorge Adrián Botello Rueda (NUA:338753)**, estudiante de la **Maestría en Ciencias Aplicadas** de la Universidad de Guanajuato. Derivado de esta revisión otorgo mi **voto aprobatorio** para que el Ing. Botello Rueda lleve a cabo la defensa de su trabajo de tesis a fin de obtener su grado de Maestro en Ciencias Aplicadas.

Sin más por el momento, le envió un cordial saludo.

Atentamente,

“La verdad os hará libres”

Dr. Edgar Vázquez Núñez

División de Ciencias e Ingenierías
Campus León

Loma del Bosque 103, Col. Lomas del Campestre, León, Gto., CP 37000

Tel. (477) 788 5100 ext. 8534

www.dci.ugto.mx



León, Gto a 21 de enero de 2020

Dr. David Yves Ghislain Delepine

Director de la División de Ciencias e Ingenierías, Campus León

Universidad de Guanajuato

PRESENTE

Por medio de la presente le comunico que he revisado la tesis titulada "**Construcción de un prototipo económico para la evaluación de la biodegradabilidad de materia orgánica bajo condiciones anaerobias**", que presentó el Ingeniero Químico Metalúrgico **Jorge Adrián Botello Rueda (NUA:338753)**, estudiante de la **Maestría en Ciencias Aplicadas** de la Universidad de Guanajuato. Derivado de esta revisión otorgo mi **voto aprobatorio** para que el Ing. Botello Rueda lleve a cabo la defensa de su trabajo de tesis a fin de obtener su grado de Maestro en Ciencias Aplicadas.

Sin más por el momento, le envió un cordial saludo.

Atentamente,

"La verdad os hará libres"

Una firma manuscrita en tinta azul que dice "Carlos E. Molina Guerrero".

Dr. Carlos Eduardo Molina Guerrero

**División de Ciencias e Ingenierías
Campus León**

Loma del Bosque 103, Col. Lomas del Campestre, León, Gto., CP 37000

Tel. (477) 788 5100 ext. 8534

www.dci.ugto.mx



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA
COORDINACIÓN INGENIERÍA DE NANOTECNOLOGÍA

Querétaro, Qro., a 15 de enero de 2020

Dr. David Yves Ghislain Delepine
Director de la División de Ciencias e Ingenierías, Campus León
Universidad de Guanajuato
PRESENTE

Por este medio hago de su conocimiento que una vez que he revisado la tesis titulada "Construcción de un prototipo económico para la evaluación de la biodegradabilidad de materia orgánica bajo condiciones anaerobias", que presentó el Ingeniero Químico Metalúrgico Jorge Adrián Botello Rueda (NUA:338753), estudiante de la Maestría en Ciencias Aplicadas de la Universidad de Guanajuato, le otorgo mi voto aprobatorio para que el Ing. Botello Rueda lleve a cabo la defensa de su trabajo de tesis a fin de obtener su grado de Maestro en Ciencias Aplicadas.

Sin otro particular por el momento, le envió un cordial saludo.

EL INGENIO PARA CREAR NO PARA DESTRUIR

Dr. Eduardo Arturo Elizalde Peña
Coordinador de Ingeniería en Nanotecnología
Profesor Investigador
Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro
Tel: +52 (442) 192 1200 x 65428
eelizalde@uaq.edu.mx

