

UNIVERSIDAD SAN PEDRO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE ESTUDIOS DE
INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA



**Diseño de un agitador mecánico para mejorar la producción de
biogás de un biodigestor semi continuo en la I.E.P.C. Bereshi –
Chimbote**

**Tesis para obtener El título Profesional de
Ingeniero Mecánico Electricista**

Autor

Vásquez Arana, Erick Segundo

Asesor – Código ORCID

Alva Julca, Ruber

Código 0000-0002-6206-278X

Chimbote-Perú

2020

PALABRAS CLAVES

Agitador mecánico, producción de biogás.

KEYWORD

Mechanical agitator, biogas production.

LINEA DE INVESTIGACION:

Área	:	Ingeniería y Tecnología
Sub área	:	Ingeniería Eléctrica, Electrónica e Informática
Disciplina	:	Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Línea de Investigación	:	Sector Energía

Título:

Diseño de un agitador mecánico para mejorar la producción de biogás de un biodigestor semi continuo en la I.E.P.C. Bereshi – Chimbote

Resumen.

El propósito del presente trabajo de investigación es diseñar un agitador mecánico, el cual consiste en las características de eje y alabes del agitador así como los componentes y materiales para el biodigestor semicontinuo en la I.E.P.C. BERESHIT- Chimbote.

La metodología de investigación obedece a un diseño descriptivo - transversal, constituye un tipo de investigación cuantitativa, en el cual se realizó el diseño de un agitador mecánico (variable independiente) para mejorar la producción de biogás (variable dependiente).

Primero se determinó los parámetros de operación del biodigestor, como son el radio base en 0.8 m, alturas de campana 0.4 m, de la pared 1.0 m y del cono de base 0.24 m, los que permitieron determinar los volúmenes de la campana 0.54 m^3 , del biodigestor 1.57 m^3 y de la base 0.16 m^3 . Además las cantidades de materia prima estiércol fue de 4.2 kg de conejo, 5.6 kg de cuy y agua 29.4 litros.

Segundo se realizó el diseño y selección del agitador mecánico, corresponde al tipo turbina de aspas inclinadas 45° , cuyo diámetro es 53.3 cm, ancho del alabe de 10.7 cm, ancho del deflector 13.3 cm y longitud del alabe 13.3 cm. Además este agitador debe girar a 56 rpm para ello se requiere de un motor eléctrico de $\frac{1}{4}$ HP. El eje de acero de 1" de diámetro AISI 1018. Finalmente se evaluó la tasa de circulación interna o flujo interno en el tanque el cual es de $0.078 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tercero se determinó los componentes del sistema de agitación mecánica del biodigestor los cuales se muestran en los planos del anexo B, así como los materiales AISI 1020, 1045, 4130, 4140 y 4340.

Cuarto se realizó la simulación numérica del agitador mecánico los valores obtenidos fueron para el Factor de Seguridad, F.S. mínimo para 800 rpm, igual a -0.37851 y el máximo para 500 rpm, igual a -0.96898.

Abstract.

The purpose of this research is to design a mechanical agitator, which consists of the characteristics of the shaft and blades of the agitator as well as the components and materials for the semi-continuous biodigester in the I.E.P.C. BERESHIT-Chimbote.

The research methodology is based on a descriptive - transversal design, it constitutes a type of quantitative research, in which the design of a mechanical agitator (independent variable) was carried out to improve the production of biogas (dependent variable).

First, the operating parameters of the digester were determined, such as the base radius at 0.8 m, bell heights 0.4 m, from the wall 1.0 m and from the base cone 0.24 m, which allowed to determine the volumes of the bell 0.54 m³, from the 1.57 m³ biodigester and 0.16 m³ base. In addition, the quantities of manure raw material were 4.2 kg of rabbit, 5.6 kg of guinea pig and water 29.4 liters.

Second, the design and selection of the mechanical agitator was carried out, corresponding to the 45 ° inclined blade turbine type, whose diameter is 53.3 cm, width of the blade 10.7 cm, width of the deflector 13.3 cm and length of the blade 13.3 cm. In addition, this agitator must rotate at 56 rpm for this requires a ¼ HP electric motor. The 1 ”diameter steel shaft AISI 1018. Finally, the internal circulation rate or internal flow in the tank was evaluated, which is 0.078 m³ / s.

Third, the components of the mechanical agitation system of the digester were determined, which are shown in the drawings in Annex B, as well as the AISI 1020, 1045, 4130, 4140 and 4340 materials.

Fourth the numerical simulation of the mechanical agitator was performed, the values obtained were for the Safety Factor, F.S. minimum for 800 rpm, equal to - 0.37851 and the maximum for 500 rpm, equal to -0.96898.

Índice

Palabras Claves	i
Título	ii
Resumen	iii
Abstract	iv
Índice	v
I. Introducción	1
II. Metodología de trabajo	38
III. Resultados	41
IV. Análisis y discusión	62
V. Conclusión	64
VI. Recomendaciones	66
VII. Dedicatoria	67
VIII. Agradecimiento	68
IX. Referencias bibliográficas	69
X. Anexo	71

I.- Introducción

El gobierno peruano, desde el 2009, en el proceso de diversificación de la matriz energética, ha realizado dos subastas de compra de electricidad a partir de energías renovables obteniendo bajas coberturas de las cuotas de biomasa, además la Dirección General de Competividad Agraria (DGCA) reveló que estudios realizados por el Ministerio de Salud en zonas rurales, se señala que el 36% de las Infecciones Respiratorias Agudas (IRAs) y el 21% de las Enfermedades Pulmonares Obstructivas Crónicas (EPOC), son producidas a causa del humo de la combustión de biocombustibles sólidos (leña, bosta y otros) usados con tecnología rudimentaria.

En este contexto, cobra singular importancia la promoción por parte del Ministerio de Agricultura (Minag) en el uso de esta tecnología para la producción de biogás, así como la difusión de los diversos beneficios colaterales de los biodigestores: agrícolas, ambientales, económicos y sociales.

Por otro lado, en nuestro país existen instalaciones de crianza de ganado como porquerizas o establos con vacas para producción de carne o leche, tanto en el medio urbano como rural, donde se producen cantidades suficientes de excretas animales las cuales podrían ser valorizadas energéticamente para producir biogás y fertilizante orgánico, en lugar de constituir fuentes de contaminación para las personas y el medio ambiente circundante. Se debe tener en cuenta que los excrementos de ganados son unas de las principales fuentes de emisión de gases de efecto invernadero como el metano; tema al que actualmente se le está dando mayor interés debido a los fenómenos meteorológicos (huracanes, inundaciones, sequías, etc.) causados por el cambio climático. Además, el biogás también contribuye en la reducción en las emisiones de dióxido de carbono, otro de los principales gases de efecto invernadero, porque puede sustituir el uso de combustibles fósiles como el gas natural o GLP.

En ese sentido la presente investigación realizada en la I.E.P.C. BERESHIT – Sector la Perla -Chimbote, provincia del Santa del departamento de Ancash, las coordenadas de ubicación son Latitud: -9.092973 y Longitud: -78.554453. Esta institución cuenta con criadero de cuyes y conejos se encuentra con la visión de usar

los excrementos de estos animales para generar biogás de autoconsumo, con el objetivo de proveerse de energía térmica y abono natural para sus huertos, cuyo efecto ambiental se describió. Para ello la institución cuenta con áreas que ayudan al buen funcionamiento de esta institución, siendo esta área de cocina, el cual requiere gas natural para su uso diario y económico.



Figura 1. Ubicación del I.E.P.C. BERESHIT

Fuente: <https://www.google.com/maps/place/I.E.P.C.+Bereshit/>

En este proyecto de tesis se diseñara un agitador mecánico para remover los desechos inorgánicos (estiércol de cuyes y conejos) ya que dicha institución cuenta con una granja, el diseño del biodigestor semi continuo es de 1.5 m^3 y ya está dado y funcionando con problemas debido al movimiento de la masa del cual se desea descomponer, en ese sentido la agitación es muy importante esta se refiere principalmente al movimiento que se genera de un material de una manera específica, principalmente con un equipo que genera movimiento circulatorio dentro de algún tipo de contenedor o estanque (biodigestor) el cual puede ser cerrado o abierto, el cual mejora el proceso de fermentación y emisión de gases.

El diseño de un agitador de fluidos (excremento de cuy y conejo) puede realizar varios propósitos al mismo tiempo y dependerán entonces para su elección tanto las características mecánicas y de proceso solicitadas en un proyecto determinado.

Mediante los antecedentes podemos proporcionar un mejor conocimiento referente al tema de estudio, se examinaron diversas fuentes relacionadas con el trabajo de investigación, entre ellas podemos mencionar los de mayor relevancia.

Es importante resaltar el trabajo de Castillo Uribe (2013) en su informe de tesis denominada: *Diseño y cálculo de un agitador de fluidos*, su trabajo de investigación tuvo como finalidad diseñar un agitador de fluidos para una mezcla de agua y soda cáustica. El autor obtuvo como resultados que la velocidad de diseño es de 115 rpm según el tipo de impulsor, la densidad y la viscosidad del fluido. En su análisis de la velocidad crítica a través del software Inventor nos permite concluir que el agitador no debe girar en una zona de 300 a 450 rpm para evitar una posible falla de resonancia debido a la configuración del agitador. Para el cálculo del diámetro del eje se utilizó la norma ASME, obteniendo un valor de 25mm de diámetro. Además realizó un análisis de esfuerzos realizados con el software BENTLEY en la estructura soportante, se hicieron utilizando perfiles tubulares cuadrados de 75x75 mm de acero estructural ASTM A-36, los que delimitan el uso de espesores superiores a 4mm, y a un esfuerzo de fluencia 2530 kg/cm². Los valores obtenidos por las ecuaciones de diseño vistas en clases y literatura, nos permitió calcular los esfuerzos a los cuales estarán soportados los elementos de las estructuras y agitador, siendo menores a los valores admisibles.

Finalmente concluye que si bien el diseño de agitadores importados es superior a lo que existe hoy en día localmente, principalmente por el prestigio alcanzado debido a la experiencia, es posible lograr los objetivos propuestos con un diseño elaborado a un costo considerablemente menor.

También el aporte de Sánchez Rubai (2016) en su tesis denominada: *Optimización de la agitación de un digestor anaerobio mediante mecánica de fluidos computacional*. En esta tesis se han simulado mediante CFD diferentes digestores a escala real (unos 2000 m³ de volumen) agitados con bomba/s de recirculación, cuya finalidad es establecer la influencia de la relación entre el diámetro y la altura, de la pendiente de la solera, del número de bombas y del caudal de recirculación en dichos digestores, definir el campo de velocidades en la masa de fango.

Obteniendo los siguientes resultados que muestran una relación diámetro/altura del digestor por encima de 1 empeora la agitación del mismo y que la pendiente en

la solera del digestor favorece que la masa de fango esté mejor mezclada, siendo más determinante la esbeltez del tanque que la pendiente de su solera. No obstante, también es necesario elegir adecuadamente los parámetros de diseño del sistema de agitación, en este caso el caudal de recirculación de fango, para obtener una agitación completa sin apenas zonas muertas. En el caso de un digestor con una geometría inadecuada es posible mejorar su agitación aumentando el número de bombas de recirculación y el caudal de las mismas, pero no se llegará a alcanzar una agitación total de la masa de fango debido a su mal diseño original.

El autor concluye que la geometría no es el único factor importante, así en un digestor con fondo cónico y relación diámetro/altura de 1, hemos pasado de tener un 84,2 % de su volumen agitado de forma eficiente a tener prácticamente todo su volumen agitado (el 98,75 %) gracias a doblar su caudal de recirculación, de 250 m³/h a 500 m³/h.

Por su parte la investigación de Quispe Candia (2017) en su tesis denominada: *Optimización técnica del sistema mecánico de agitación de la salmuera en el procesamiento de la aceituna*. Su trabajo de investigación tuvo como finalidad analizar y determinar la mejor solución para un equipo de agitación que sirve para preparar la salmuera, el cual se encontró con serios problemas de operatividad y eficiencia en mezcla y agitación, enfocados en optimizar; rediseñando el agitador mecánico y el recipiente de agitación, que permite que el proceso de preparación de la salmuera, sea eficiente y operativo. El autor llegó a los siguientes resultados y conclusiones que para la optimización del Sistema de Agitación de preparación de la salmuera, se seleccionó una turbina con cuatro (4) palas inclinadas a 45°, apropiada para este proceso de agitación, el cual se encuentra a 200 mm del fondo del recipiente, con 200 mm de diámetro. Con esta propuesta se logra que la sal industrial pueda disolverse eficientemente en el recipiente. Así para el diseño del eje propulsor se calculó el momento flector y torsor, se determinó un diámetro de eje de 23 mm, pero se estimó a un diámetro comercial de 25,4 mm. Las dimensiones del impulsor son adecuadas para un motor de 1,1 kW (1,5 HP), obteniendo mayor potencia arrastre. También para neutralizar los remolinos y obtener una mezcla eficiente; se adicionó cuatro (4) placas deflectoras de 85 mm de ancho y seis (6) mm de espesor, alrededor del recipiente y se redujo la velocidad angular del eje impulsor a 662 rpm.

También es importante mencionar la investigación de Taipe Castro (2019) en su tesis denominada: *Diseño de un biodigestor para mejorar la obtención de biogás y biol*. En su trabajo de investigación tuvo como objetivo diseñar un biodigestor para mejorar la obtención de biogás y biol el cual comprende la fabricación de un prototipo. Los resultados obtenidos mediante la aplicación de la norma VDI 2221 en el diseño del biodigestor permitió encontrar la alternativa de solución óptima, posteriormente la fabricación del prototipo, y que luego de los cálculos respectivos se determinaron los siguientes parámetros: el volumen del biodigestor es de 1.04 m³, el volumen de producción estimada del biogás es de 315.6 litros/día, el volumen de biol es de 7 litros/día. Por otro lado, en el digestor se utilizó la bosta como biomasa que se mezcló con agua en una proporción de 1:3, que luego de la descomposición anaerobia permitió encontrar los parámetros como el tiempo de retención que fue de 28 días en comparación a los 50 días del biodigestor del grupo de control. De igual manera, se determinó que el volumen de gas obtenido alcanza para utilizarse en la cocina por 2 horas 30 minutos/día. Además respecto al diseño del agitador este es del tipo vertical con 5 hélices, distribuidos a lo largo de un eje y cubre la altura del volumen líquido de la mezcla en el digestor, El agitador debe girar lentamente y manualmente, y se debe dar de 4 a 6 vueltas diariamente.

Además por su parte la investigación de Téllez Santana (2008) en su tesis denominada: *Diseño y selección de elementos para una planta de biogás*. Su trabajo de investigación tuvo como finalidad diseñar y seleccionar los componentes básicos de una planta de biogás, que sea capaz de recepcionar las excretas de un plantel de 100 vacas lecheras. Los resultados obtenidos fueron primero la construcción de una planta de biogás necesita de una alta inversión inicial, operacionalmente es de baja o nula rentabilidad por lo que su ejecución obedece más que a una evaluación económica a una de carácter ambiental, dada las cada vez mayores exigencias de la legislación nacional e internacional sobre el manejo de purines. Además en este caso particular el gas producido en el día, alcanza para abastecer el quemador por 7,5 horas, para ello fue necesario el uso de agitador, cuya selección del agitador fue llevada a cabo por la empresa ingeniería Lecaros y Cía Ltda, de acuerdo a las características del digestor. El digestor sugerido es un agitador marca DHIWOLL, modelo DWD 90 con una potencia de 5,5 Kw.

Finalmente el trabajo de investigación de Vega Arquíño (2015), denominada: *Diseño ,construcción y evaluación de un biodigestor semicontinuo para la generación de biogas con la fermentación anaeróbica del estiércol de cuy y de conejo para la I.E.P.C.Bereshi*, su trabajo de investigación propone una solución tecnológica para el uso de los residuos generados en la granja de la Institución Educativa Particular Cristiana Bereshi, para lo cual se diseñó y se construyó un biodigestor tipo chino para la obtención de biogás. Se analiza, se adapta y hace viable la aplicación de la tecnología para mejorar la fermentación; utilizando las excretas de los cuyes y de conejos como materia prima para la producción de biogás, que sirvan como: fuente de energía. Todo ello priorizando el uso de los recursos locales y que sea asumible por la Institución Educativa Particular Cristiana Bereshi para su operación y mantenimiento lo cual ha significado trabajar en una metodología participativa involucrando al beneficiario en todo el proceso. El desarrollo de la experiencia ha tenido las siguientes etapas: Análisis del estiércol de cuy y de conejo, para saber sus propiedades químicas y para el proceso de fermentación, cálculo del dimensionamiento del Biodigestor modelo tipo chino, construcción del Biodigestor en base a los datos obtenidos de la cantidad de mezcla a utilizar, experimentación e investigación en la etapa inicial de fermentación, seguimiento de la metodología y proceso de la fermentación, mejoramiento de la fermentación, para optimizar la producción de biogás. Se obtuvo Biogás, con una producción total de 6 m³, con una velocidad de producción de 0.194 m³/día y una concentración de metano del 55% dentro de la composición del biogás. a partir de la fermentación anaeróbica del estiércol de cuy y de conejo.

La elaboración de esta investigación tiene por objetivo fundamental de mejorar la producción de biogás de un biodigestor semi continuo, el cual se encuentra en la IEPC Bereshi – Chimbote, para ello se propone la implementación de un sistema agitador mecánico que permitirá mantener un mezcla uniforme de los componentes y una descomposición de los excrementos más efectivos, en tal sentido la justificación se propone en los siguientes ámbitos:

Justificación social.

Porque se disminuirá el uso de combustibles no renovables (GLP) causan más daño al medio ambiente por las emisiones contaminantes producidas por la combustión y a la salud de la población directamente pues estos gases generan diversas enfermedades atacando principalmente a la población vulnerable como son niños, gestantes y ancianos.

Justificación tecnológica.

Porque el biogás obtenido en este proceso de transformación de materiales es producido a partir de la biofermentación anaerobia de la materia orgánica, se ha convertido en los últimos años en una de las alternativas energéticas más atractivas. El uso de esta tecnología permite en comunidades rurales satisfacer las necesidades de energía para la cocción de alimentos utilizando excremento ha tenido un crecimiento en los últimos años.

Justificación práctica.

Porque contribuirá directamente en la conservación del ambiente y de generar una forma nueva de abono orgánico que beneficia la fertilidad del subsuelo y cultivos en el sector rural y urbano alejado de ciudad, a bajos costos, lo que beneficia a toda la cadena de producción de comienzo a fin. Otro de los elementos justificativos que se contribuye en la práctica es debido a los generados para contribuir a la cadena de abastecimiento como el compostaje de excelente calidad.

Justificación metodológica.

Porque en esta investigación aplicaremos una metodología de cálculo para el diseño y dimensionamiento del sistema de agitación mecánica basado en la ingeniería de fluidos, selección de equipos y materiales enfocados a la ingeniería mecánica y determinación de la eficiencia del sistema para mejorar la producción de biogás. Para tal finalidad aplicaremos un procedimiento basado en las teorías fundamentales y aplicaciones tecnológicas, dentro del marco teórico se definieron los

conceptos básicos de la agitación y las aplicaciones utilizadas en los variados procesos dentro de la industria.

Por lo tanto, nos planteamos la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo la realización del diseño de un agitador mecánico que será usado en el biodigestor semi continuo podrá mejorar la producción de biogás, para la I.E.P.C. Bereshit- Chimbote?

Presentaremos ahora la fundamentación teórica relacionada con el trabajo de investigación:

Los agitadores mecánicos, son usados para la preparación de reactivos tales como sulfato de aluminio, lechada de cal, carbón activado, permanganato de sodio, área, soda cáustica y polímeros, en el tratamiento y almacenaje de productos químicos y agroalimenticios, preparación de barnices y pinturas y preparación de pasta de papel. (www.indostracom.com).

Mezclar no es lo mismo que agitar. Agitación se refiere a forzar un fluido por medios mecánicos para que adquiera in movimiento generalmente circulatorio en el interior de un recipiente. Mezcla es la distribución al azar, de dos fases inicialmente separadas. Eso implica partir de dos fases individuales, tales como un fluido líquido y un sólido o dos fluidos de distinta densidad, y lograr que ambas fases se distribuyan al azar entre sí. (**Lujan, sf**).

Según Quispe (2017) el propósito de la agitación en la industria tiene como objetivos más frecuentes:

Suspensión de partículas sólidas.

Mezclado de líquidos miscibles, por ejemplo, alcohol metílico y agua.

Dispersión de un gas a través de un líquido en forma de pequeñas burbujas.

Dispersión de un segundo líquido, inmiscible con el primero, para formar una emulsión o suspensión de gotas finas.

Promoción de la transferencia de calor entre el líquido y un serpentín o encamisado.

Además es importante señalar que los agitadores tienen aplicaciones en procesos de:

- Homogeneización.
- Neutralización.
- Floculación.
- Disolución.
- Precipitación.
- Cristalización.
- Emulsión.
- Dispersión.
- Mantenimiento de fangos en suspensión

Con el objeto de distribuir de mejor forma los microorganismos, es esencial una agitación de forma periódica de la biomasa en digestión. (Fuenzalida, 1995)

Se distinguen 3 tipos básicos de agitación:

- Mecánica: A través de agitadores.
- Hidráulica: A través de bombas se hace recircular la biomasa.
- Burbujeo de Biogás: Se recircula el biogás producido al fondo del biodigestor por medio de cañerías, para producir burbujas.

Los agitadores se dividen en dos clases: los que generan corrientes paralelas al eje del agitador y los que dan origen a corrientes en dirección tangencial o radial. Los primeros se llaman agitadores de flujo axial y los segundos agitadores de flujo radial.

Los tres tipos principales de agitadores son, de hélice, de paletas, y de turbina. Cada uno de estos tipos comprende muchas variaciones y subtipos que no consideraremos aquí. En algunos casos también son útiles agitadores especiales, pero con los tres tipos antes citados se resuelven, quizás, el 95% de los problemas de agitación de líquidos. (Torres y Vaca, 2010)

Los tres tipos principales de agitadores son:

- a. Un agitador de hélice, es un agitador de flujo axial, que opera con velocidad elevada y se emplea para líquidos pocos viscosos. Los agitadores de hélice

más pequeños, giran a toda la velocidad del motor, unas 1.150 ó 1.750 rpm; los mayores giran de 400 a 800 rpm.

Las corrientes de flujo, que parten del agitador, se mueven a través del líquido en una dirección determinada hasta que son desviadas por el fondo o las paredes del tanque. La columna de remolinos de líquido de elevada turbulencia, que parte del agitador, arrastra en su movimiento al líquido estancado, generando un efecto considerablemente mayor que el que se obtendría mediante una columna equivalente creada por una boquilla estacionaria. Las palas de la hélice cortan o friccionan vigorosamente el líquido. Debido a la persistencia de las corrientes de flujo, los agitadores de hélice son eficaces para tanques de gran tamaño. Para tanques extraordinariamente grandes, del orden de 1500 m³ se han utilizado agitadores múltiples, con entradas laterales al tanque. (Quispe, 2017)

El diámetro de los agitadores de hélice, raramente es mayor de 45 cm, independientemente del tamaño del tanque. En tanques de gran altura, pueden disponerse dos o más hélices sobre el mismo eje, moviendo el líquido generalmente en la misma dirección. A veces dos agitadores operan en sentido opuesto creando una zona de elevada turbulencia en el espacio comprendido entre ellos. (www.ecured.cu)



Figura 2. Agitador de Hélice

Fuente: <https://www.fishersci.es>

- b. El agitador de palas o paletas es un agitador eficaz está formado por una paleta plana, que gira sobre un eje vertical. Son corrientes los agitadores formados por dos y 3 paletas. Las paletas giran a velocidades bajas o moderadas en el centro del tanque, impulsando al líquido radial y tangencialmente, sin que exista movimiento vertical respecto del agitador, a menos que las paletas estén inclinadas. Las corrientes de líquido que se originan se dirigen hacia la pared del tanque y después siguen hacia arriba o hacia abajo. Las paletas también pueden adaptarse a la forma del fondo del tanque, de tal manera que en su movimiento rascan la superficie o pasan sobre ella con una holgura muy pequeña. (Torres y Vaca, 2010).

Un agitador de este tipo se conoce como agitador de ancla. Estos agitadores son útiles cuando se desea evitar el depósito de sólidos sobre una superficie de transmisión de calor, como ocurre en un tanque enchaquetado, pero no son buenos mezcladores. Generalmente trabajan conjuntamente con un agitador de paletas de otro tipo, que se mueve con velocidad elevada y que gira normalmente en sentido opuesto.

Los agitadores industriales de paletas giran a una velocidad comprendida entre 20 y 150 rpm. La longitud del rodete de un agitador de paletas es del orden de 50 al 80% del diámetro interior del tanque. La anchura de la paleta es de un sexto a un décimo de su longitud. A velocidades muy bajas, un agitador de paletas produce una agitación suave, en un tanque sin placas deflectoras o cortacorrientes, las cuales son necesarias para velocidades elevadas. De lo contrario el líquido se mueve como un remolino que gira alrededor del tanque, con velocidad elevada pero con poco efecto de mezcla. (www.ecured.cu).

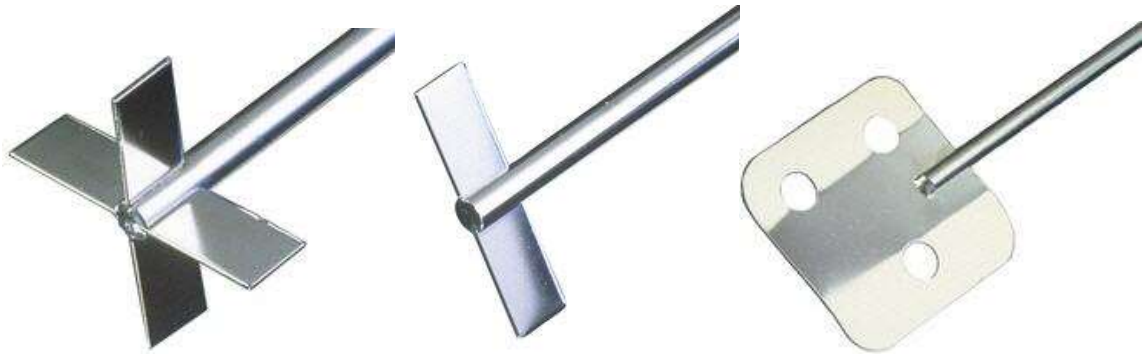


Figura 3. Agitador de Palas o Paletas

Fuente: <http://ictsl.net/mobile/pda/productos/acero/0000009f3a130ac7d.html>

- c. Los agitadores de turbina son eficaces en intervalos de viscosidades; en líquidos poco viscosos, producen corrientes intensas, que se extienden por todo el tanque y destruyen las masas de líquido estancado. (Quispe, 2017).

La mayor parte de ellos se asemejan a agitadores de múltiples y cortas paletas, que giran con velocidades elevadas sobre un eje que va montado centralmente dentro del tanque. Las paletas pueden ser rectas o curvas, inclinadas o verticales. El rodete puede ser abierto, semicerrado o cerrado. El diámetro del rodete es menor que en el caso de agitadores de paletas, siendo del orden del 30 al 50% del diámetro del tanque. Los agitadores de turbina son eficaces para un amplio intervalo de viscosidades; en líquidos poco viscosos, producen corrientes intensas, que se extienden por todo el tanque y destruyen las masas de líquido estancado. En las proximidades del rodete existe una zona de corrientes rápidas, de alta turbulencia e intensos esfuerzos cortantes. (Torres y Vaca, 2010)

Las corrientes principales son radiales y tangenciales. Los componentes tangenciales dan lugar a vórtices y torbellinos, que se deben evitar por medio de placas deflectoras o un anillo difusor, con el fin de que el rodete sea más eficaz.

El agitador de turbina semiabierto, conocido como agitador de disco con aletas, se emplea para dispersar o disolver un gas en un líquido. El gas entra por la parte inferior del eje del rodete; las aletas lanzan las burbujas grandes y

las rompen en muchas pequeñas, con lo cual se aumenta grandemente el área interfacial entre el gas y el líquido. (www.ecured.cu).

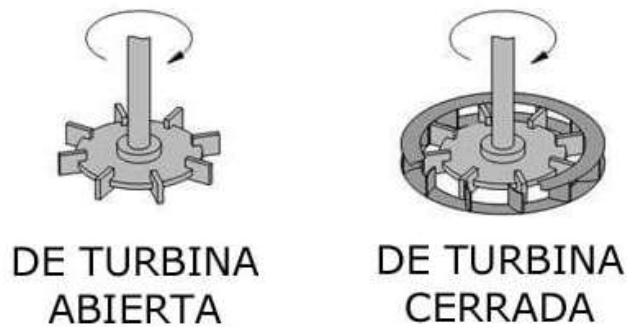


Figura 4. Agitador de Turbina

Fuente: <https://intech-gmbh.es/mixers/>

Las propelas o helices para estos agitadores mecánicos se pueden clasificar:

Propela Marina (Para bajos caudales), utilizado para el mantenimiento en suspensión de sólidos, homogeneización emulsión. Tienen un porcentaje de turbulencia medio.

Propela Curva Tripala (Para altos caudales). El flujo predominantemente axial, aseguran un bombeo de gran eficacia. Velocidades elevadas y un mínimo consumo de energía. Turbulencia baja moderada.

Propela Cowles (Diente de sierra). Rompe las partículas sólidas, las aparta y dispersa uniformemente logrando así una ideal mezcla sólido-líquido. Su flujo es predominantemente radial.

Propela con Raspadores. Formado por una paleta plana, que gira sobre un eje vertical. Las paletas giran a velocidades bajas o moderadas en el centro del tanque, impulsando al líquido radial y tangencialmente, sin que exista movimiento vertical respecto del agitador, a menos que las paletas estén inclinadas. Estos agitadores son útiles cuando se desea evitar el depósito de sólidos sobre una superficie de transmisión de calor.

Propela Bipala (Para floculación). Utilizado para la floculación en aguas ligeramente cargadas de materiales sólidos. Flujo predominantemente radial.

Turbina Axial - 45° (Para homogeneización). Flujo predominantemente axial con un componente radial. Para suspensión o favorecer el intercambio térmico en medios no viscosos. Turbulencia elevada. Polipropileno Soporta temperaturas hasta de 120°C, ideal para el manejo de ácidos y fluidos corrosivos tales como ácido clorhídrico, soda cáustica, cloruro férrico, entre otros.

Disco Dispensor de Gases. Turbinas de palas planas. Adaptado a la transferencia gas-líquido, así como a los intercambios térmicos en medio no viscoso. Flujo radial. Procentaje de turbulencia elevado.

Impeler 'Bar Turbine'. Impulsor de tipo axial, utilizado en la mezcla de líquido - gas. Gira a altas RPM (1800 y 3600) logrando romper las burbujas de aire ó gas y generando en los productos una emulsión.



Figura 5. Clasificación de Propelas o Helices para estos Agitadores Mecánicos

Fuente: www.indostra.com/

El uso de agitadores y mezcladores para tanques estiercoleros, biodigestores y lagunas de oxidación, con motores antideflagrantes para su uso en atmósferas explosivas, es de importancia debido a la eficiencia del proceso.

Las potencias de los motores oscilan entre 1 hasta 22 kW, los agitadores y mezcladores se fabrican íntegramente en Alemania en acero inoxidable. Los motores de los agitadores y mezcladores cumplen con la normativa ATEX. (<https://www.aqualimpia.com/biodigestores-agitadores/>).

La empresa AQUALIMPIA suministra agitadores de ejes largos de hasta 6,5 m y potencias de hasta 30 HP. Realiza la instalación y asesora para el diseño estructural y constructivo de los pozos de agitación.

Ventajas de los sistemas de agitación:

Los agitadores garantizan la producción de biogás y son necesarios debido también a las siguientes razones.

Mezcla de la biomasa fresca con la biomasa digerida existente al interior del digestor

Mejor distribución, mezcla de nutrientes y calor dentro del digestor

Reduce la formación de costras, sedimentos y flóculos de biomasa que pueden sedimentarse en el fondo del digestor

Mejoran y facilitan la extracción de biogás (se “sueltan” las burbujas de biogás)

Mayor producción de biogás



Figura 6. Agitador mecánico para biodigestor

Fuente: <https://www.aqualimpia.com/biodigestores-agitadores/>

Selección del agitador en intervalos de viscosidad

La viscosidad del fluido es un factor determinante que influye en la selección del tipo de agitador. En la tabla I se detallan los intervalos específicos de viscosidad para cada tipo de agitador. (Raxón, 2013)

Tabla 1

Intervalos de viscosidad para los diferentes tipos de agitadores

Tipo de Agitador	Viscosidad (pascales)
Propulsores	< 3
Turbinas	< 100
Paleta modificada	50 – 100
Helicoidales y banda	> 500

Fuente: GEANKOPLIS, Christie J. Procesos de transporte y operaciones unitarias. p. 163.

Diseño típico de un sistema de agitación

El agitador de turbina es el agitador más usado en las industrias de proceso. Para diseñar un sistema de agitación ordinario, generalmente se usa este tipo de agitador en el diseño inicial posteriormente se ajusta el diseño al tipo adecuado o que mejor se desempeñe, mostrado en la figura 7.

El número de placas deflectoras es generalmente de 4; el número de palas del agitador varía entre 4 y 16, pero generalmente es de 6 u 8. Situaciones especiales pueden, por supuesto, aconsejar proporciones diferentes de las que se acaban de indicar; por ejemplo, puede resultar ventajoso colocar el agitador más alto o más bajo en el tanque, o bien puede ser necesario utilizar un tanque más profundo para alcanzar el resultado apetecido. (Raxón, 2013)

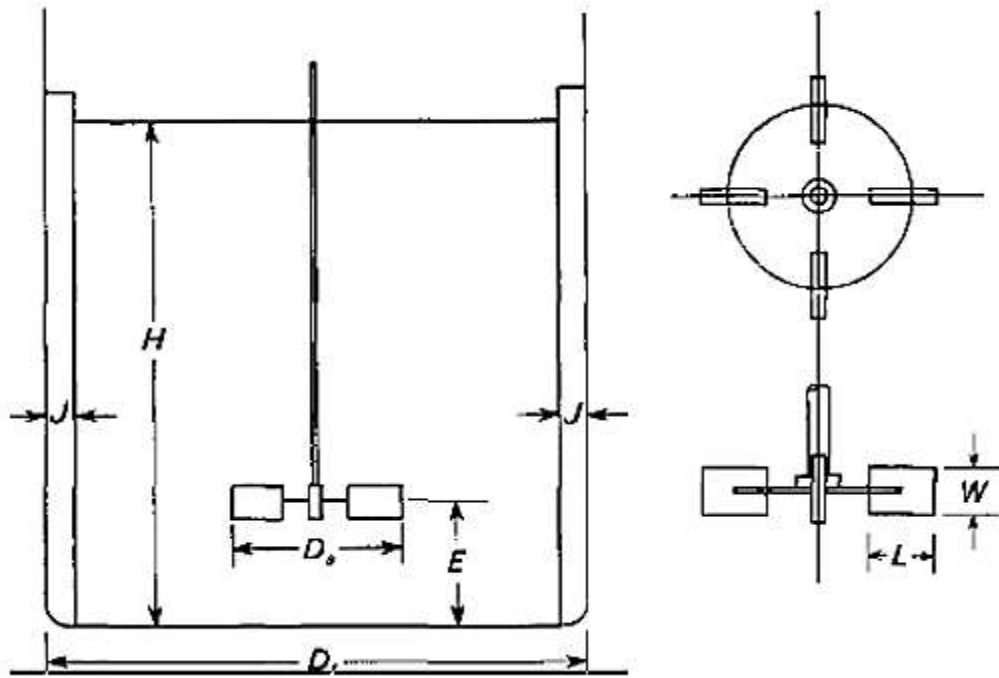


Figura 7. Dimensiones de un agitador de turbina normal

Fuente: McCABE, Warren L. Operaciones unitarias en ingeniería química. p. 251.

Las proporciones geométricas del sistema de agitación, teniendo en consideración las geometrías del tanque de agitación como parte del sistema, que se considera como el diseño típico se muestran en la tabla 2.

Tabla 2

Proporciones geométricas para un sistema de agitación normal

Relación	Proporción
D_a / D_T	0.3 - 0.5
W / D_a	1/5
D_d / D_a	2/3
H / D_T	1
L / D_a	1/4
C / D_T	1/3
J / D_T	1/12

Fuente: McCABE, Warren L. Operaciones unitarias en ingeniería química. p. 251.

Numero de Reynolds N_{RE}

La presencia o ausencia de turbulencia puede correlacionarse con el número de Reynolds del impulsor, es una expresión adimensional que permite caracterizar el movimiento de un fluido, relaciona densidad, viscosidad, velocidad y la dimensión típica de un flujo, se define como:

$$N_{RE} = \frac{Da^2 N \rho}{\mu}$$

Donde:

Da : Diámetro del Agitador (m)

N : velocidad de rotación (rps)

ρ : densidad de la mezcla (kg/m^3)

μ : viscosidad de la mezcla (Pa.s)

El valor del número de Reynolds define si el carácter del fluido es turbulento o laminar, según:

Régimen laminar: $Re < 10$

Régimen transitorio: $300 < Re < 10000$

Régimen turbulento: $Re > 10000$

Potencia consumida en sistemas de agitación

Un factor trascendental en el diseño de un recipiente de agitación es la potencia necesaria para mover el impulsor. Puesto que la potencia requerida para un sistema dado no puede predecirse teóricamente, se tienen correlaciones empíricas para estimar los requerimientos de potencia.

El consumo de potencia se relaciona con la densidad del fluido, su viscosidad, la velocidad de rotación y el diámetro del impulsor, por medio de gráficas de número de potencia en función del número de Reynolds del fluido en el tanque.

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 Da^5}$$

Donde:

P : potencia de agitación del impulsor (watts)

N : velocidad de rotación (rps)

D_a : diámetro del agitador (m)

ρ : densidad de la mezcla (kg/m^3)

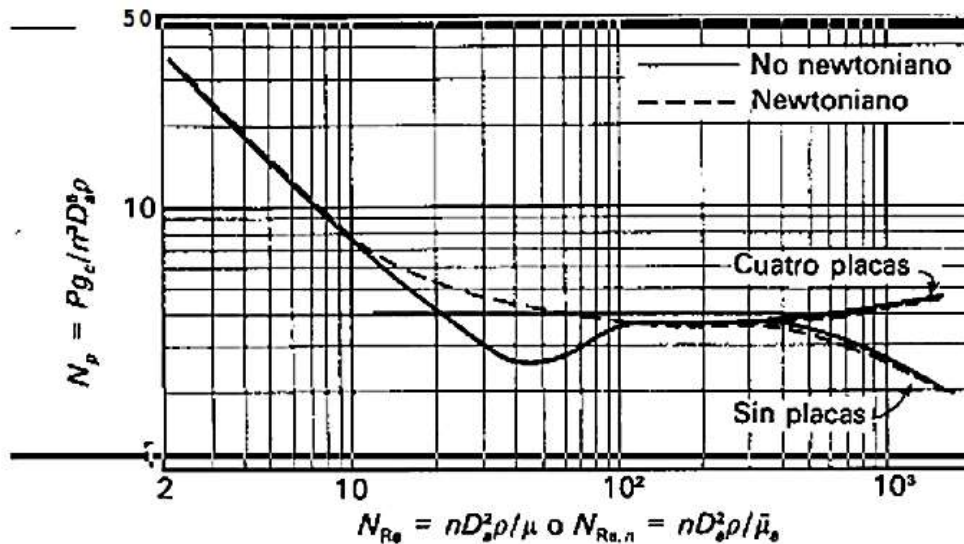


Figura 8. Correlación de potencia para una turbina de seis palas en función del número de Reynolds
Fuente: McCABE, Warren L. Operaciones unitarias en ingeniería química. p. 266.

Consumo de potencia para $N_{RE} < 300$ con o sin placas deflectoras

Para este caso con $Re < 300$, las líneas de N_p v/s Re coinciden para un estanque con o sin placas deflectoras. En este intervalo el flujo es laminar y la densidad no influye. La ecuación de potencia queda de la siguiente manera:

$$P = KL * N^2 * Da^3 * \mu$$

Consumo de potencia para $N_{RE} > 10.000$ con placas deflectoras.

En este caso el N_p es independiente del Re y la viscosidad no influye. En este intervalo el flujo es turbulento. La potencia puede estimarse a partir del producto del flujo generado por el impulsor y la energía cinética por unidad de volumen del fluido. La ecuación queda de la siguiente manera:

$$P = KT * N^3 * Da^5 * \rho$$

Donde las constantes KL y KT son mostradas en la tabla 3.

Tabla 3

Constantes KL y KT para el cálculo de la potencia.

Tipo de impulsor	KL	KT
Hélice paso cuadrado, tres palas	41.0	0.32
Hélice paso de 2, tres palas	43.5	1.00
Turbina, seis palas planas	71.0	6.30
Turbina, seis palas curvas	70.0	4.80
Turbina de ventilador, seis palas	70.0	1.65
Turbina dos palas planas	36.5	1.70
Turbina cerrada, seis palas curvas	97.2	1.08

Número de Froude (Fr)

El número de Froude es una medida que relaciona la fuerza de inercia y la fuerza gravitacional por unidad de área que actúa sobre el fluido. Se utiliza en el cálculo del consumo de potencia cuando el fluido del estanque mantenga un movimiento de ondas importante a causa de la falta de placas deflectoras.

$$Fr = \frac{N^2 D_a}{g}$$

Donde:

N: velocidad de rotación (rps)

Da: diámetro del agitador (m)

g: aceleración de la gravedad (m/s²)

Tiempo de mezclado para líquidos miscibles

Para poder estimar el tiempo necesario para realizar una mezcla homogénea de líquidos en sistemas con agitadores de turbina, se hace uso de un factor adimensional de mezcla, el que se relaciona con el número de Reynolds. El factor adimensional de mezcla; se define como, donde todos los factores son ya conocidos y g es la aceleración normal de la gravedad:

$$N_p = \frac{Da^{0.5}(N Da)g^{0.2}}{\rho N^3 Da^5}$$

Donde

Da : Diámetro del Agitador

N : velocidad de rotación

ρ : densidad de la mezcla

g : aceleración de la gravedad

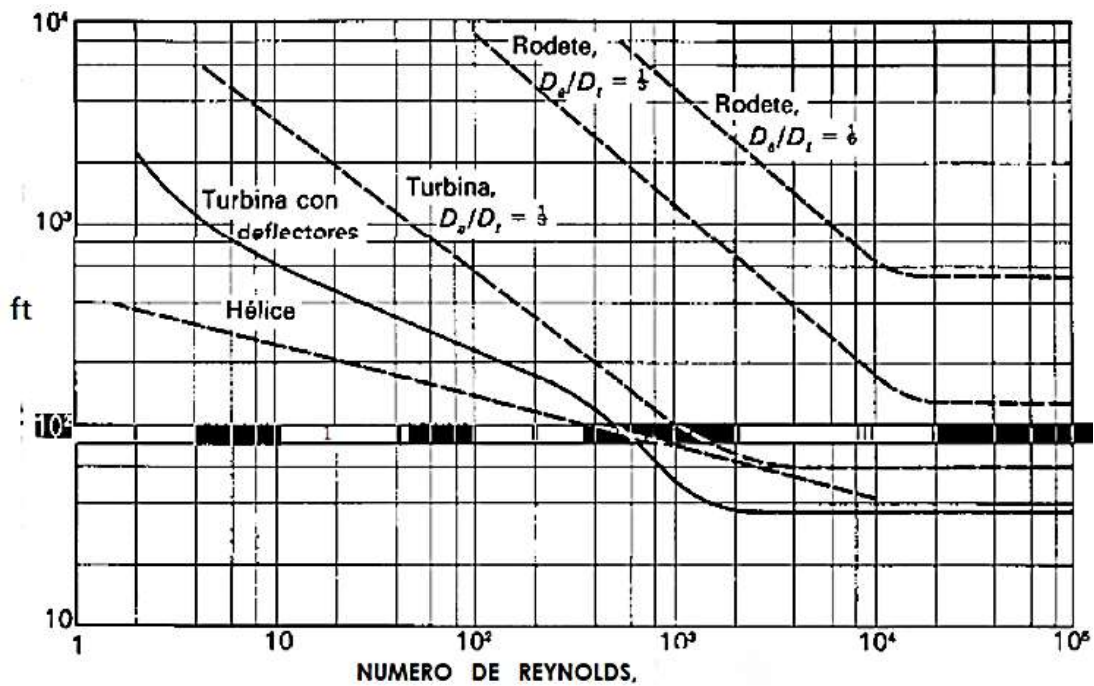


Figura 9. Tiempo de mezcla en tanques agitados

Fuente: McCABE, Warren L. Operaciones unitarias en ingeniería química. p. 268.

Sistema de biogás

El biogás es una mezcla de gases cuyos principales componentes son el metano y el bióxido de carbono, el cual se produce como resultado de la fermentación de la materia orgánica en ausencia del aire, por la acción de un grupo de microorganismos.

En la naturaleza se encuentra una gran variedad de residuos orgánicos a partir de los cuales puede obtenerse biogás, entre ellos se encuentran: los desechos provenientes de animales domésticos como vacas, cerdos y aves, residuos vegetales como pajas, pastos, hojas secas y basuras domésticas.

La Composición del Biogás, con el término biogás se designa a la mezcla de gases resultantes de la descomposición de la materia orgánica realizada por acción bacteriana en condiciones anaerobias. La composición de biogás depende del tipo de desecho utilizado y las condiciones en que se procesa. Los principales componentes del biogás son el metano (CH_4) y el dióxido de carbono (CO_2). Aunque la composición del biogás varía de acuerdo a la biomasa utilizada, su composición aproximada se presenta a continuación (Werner, 1989):

Metano, CH_4 54 - 70% volumen

Bióxido de carbono, CO_2 27 – 45%

Hidrógeno, H_2 1 - 10%

Nitrógeno, N_2 0.5 – 3%

Ácido Sulfídrico, H_2S 0.1%

El metano, principal componente del biogás, es el gas que le confiere las características combustibles al mismo. El valor energético del biogás por lo tanto estará determinado por la concentración de metano alrededor de 20 – 25 MJ/m³, comparado con 33 – 38 MJ/m³ para el gas natural. El metano es un gas combustible, incoloro, inodoro, cuya combustión produce una llama azul y productos no contaminantes. Veintiuna veces más activo que el gas carbónico, el biogás contribuye también muy activamente al "efecto invernadero". Para evitar estos inconvenientes, su eliminación se ha hecho obligatoria para las mayores instalaciones. Generalmente quemado en chimeneas, puede servir también para producir electricidad: un m³ de biogás equivale a medio metro cúbico de gas natural, es decir, 5 kw/h.

Hasta ahora, su explotación estaba limitada por los compuestos corrosivos del biogás y por su composición fluctuante. Efectivamente, ésta varía en función de las condiciones climáticas: según la humedad, la temperatura, la presión atmosférica y el modo de captación, su tenor en metano, que confiere al biogás su poder calorífico, oscila entre un 30 y un 60 %, con el resultado de que los motores, afectados por una corrosión y un atascamiento importantes, deben someterse a un ajuste delicado.

Por consiguiente, el biogás se mezcla generalmente con gas natural antes de ser utilizado en las centrales eléctricas.

Desechos agrícolas y animales con potencial para producir metano.

Desechos Animales: estiércoles, cama, desechos alimenticios, orina, etc.

Residuos Agrícolas: Semillas, pajas, bagazo de caña, etc.

Desechos de Rastros: Sangre, carne, desechos de pescado, etc.

Residuos Agroindustriales: aserrín, desechos de tabaco, cascarilla de arroz, desechos de frutas y vegetales, etc.

Residuos Forestales: Ramas, hojas, cortezas, etc.

La producción de Biogás, como se señaló anteriormente, el biogás se produce mediante el proceso de fermentación de la materia orgánica en ausencia de aire o sea en condiciones anaeróbicas, quedando como residuo el proceso de lodo estabilizado que es un excelente mejorador de suelos con un alto valor fertilizante. Debido a esto último, es factible procesar los desechos animales y residuos agrícolas que se encuentran presentes en el medio rural para producir gas combustible, sin afectar el uso actual que se le da a estos materiales, los que generalmente se reincorporan a los terrenos de cultivo.

En la práctica, los desechos mezclados con agua se introducen a un recipiente cerrado llamado digestor, que es donde se realiza el proceso de generación de biogás. Cuando el digestor es de carga diaria, como se verá más adelante, todos los días se carga con una cantidad dada de desechos mezclados con agua y del digestor sale un volumen de lodos fertilizantes igual al de la mezcla alimentada; el biogás se genera en forma continua durante todo el día. Cuando se trata de un digestor que trabaja a régimen de “lote”, se carga todo de una sola vez, no descargándose hasta después de dos o tres meses, cuando se vacía el residuo y se aplica al campo; en este caso la cantidad de biogás producida es mayor en las primeras semanas y va bajando a medida que transcurre el tiempo, por lo que casi siempre se instalan varios digestores en “batería”, los que se cargan en forma alternada, con objeto de disponer siempre de la cantidad requerida de biogás.

La utilización de los biodigestores además de permitir la producción de biogás ofrece enormes ventajas para la transformación de desechos: Mejora la capacidad fertilizante del estiércol. Todos los nutrientes tales como nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio así como los elementos menores son conservados en el efluente. En el caso del nitrógeno, buena parte del mismo, presente en el estiércol en forma de macromoléculas es convertido a formas más simples como amonio (NH_4^+), las cuales pueden ser aprovechadas directamente por la planta. Debe notarse que en los casos en que el estiércol es secado al medio ambiente, se pierde alrededor de un 50% del nitrógeno (Hohlfeld y Sasse 1986). Control de patógenos. Aunque el nivel de destrucción de patógenos variará de acuerdo a factores como temperatura y tiempo de retención, se ha demostrado experimentalmente que alrededor del 85% de los patógenos no sobrevive el proceso de biodigestión (Hohlfeld y Sasse 1986). En condiciones de laboratorio, con temperaturas de $35 < \text{C}$ los fecales fueron reducidos en 50 – 70% y los hongos en 95% en 24 horas (Marchaim 1992).

A continuación se da una breve explicación de los parámetros que controlan el proceso. Es conveniente aclarar que a pesar de que es recomendable operar los sistemas lo más cerca posible de las condiciones óptimas para lograr una buena eficiencia de generación de biogás, esto no siempre es factible en el medio rural. Por lo tanto, se deberán buscar las mejores condiciones dentro de las posibilidades existentes en el sitio, manteniendo la operación sencilla y sin complicaciones para el usuario.

La fermentación anaeróbica de la materia orgánica se lleva a cabo por la acción de diversas familias de bacterias. Usualmente se consideran dos etapas de dicho proceso:

1ra. Etapa: formación de ácidos

2da. Etapa: formación de gases

En la primera etapa la materia prima es atacada por las bacterias formadoras de ácidos, mismas que convierten los desechos en compuestos más simples como los ácidos acético, butírico y propiónico. En la segunda etapa los ácidos formados en la primera son convertidos a metano y bióxido de carbono por acción de otro grupo de bacterias.

Todos estos procesos se llevan a cabo simultáneamente dentro del digestor, al cual sólo se alimenta la materia prima en las condiciones adecuadas.

Tomando en cuenta que las bacterias son el ingrediente esencial del proceso, es necesario mantenerlas en condiciones que permitan asegurar y optimizar su ciclo biológico.

A continuación analizaremos detalladamente los parámetros que influyen directamente en la formación del metano.

La temperatura del proceso se lleva a cabo en un amplio rango de temperaturas, desde 15 hasta 60 grados centígrados. Sin embargo, para que las bacterias formadoras de metano trabajen en forma óptima, se requiere mantenerlas a temperaturas que oscilan entre 30 y 60 grados centígrados, dependiendo del tipo de bacterias que se adapten y desarrollen.

En la práctica, sobre todo en pequeños sistemas instalados en el medio rural, no se controla la temperatura del proceso, y se trabaja a temperatura ambiente sin proporcionar calor al digestor. Una forma simple de aumentar la temperatura de operación y con ello la cantidad de biogás producido, es calentar el agua con la que se va a efectuar la mezcla, por ejemplo en calentadores solares. En la gran mayoría de los casos, los digestores se construyen para evitar que se pierda mucho calor.

Los rangos para el desarrollo óptimo del proceso, se distinguen dos rangos de temperatura, el mesofílico de 30 a 40 grados centígrados y el termofílico de 55 a 60 grados centígrados.

Rango Mesofílico (30-40 °C): Las bacterias que se desarrollan en este rango de temperatura se reproducen fácilmente y pueden permanecer activas si no ocurren cambios súbitos de temperatura. La temperatura óptima es de 35 °C y la mayoría de los desechos orgánicos se pueden digerir a esta temperatura produciendo biogás.

Rango Termofílico (55-60 ° C): Este rango de temperatura, en el que produce mayor cantidad de biogás que en el anterior y en tiempos más cortos, en general sólo es usado en las grandes instalaciones a nivel industrial, ya que se requiere de un control muy preciso. Las bacterias termofílicas son muy sensibles a los cambios de

temperatura y en pequeños sistemas resulta antieconómico mantener esta temperatura controlada, especialmente en climas fríos. (www.planthogar.net, 2012).

Biodigestor

Es un contenedor hermético que permite la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas y facilita la extracción del gas resultante para su uso como energía. El biodigestor cuenta con una entrada para el material orgánico, un espacio para su descomposición, una salida con válvula de control para el gas (biogás), y una salida para el material ya procesado (bioabono).

Condiciones para la biodigestión

La temperatura es muy importante para la producción de biogás, ya que los microorganismos que realizan la biodigestión disminuyen su actividad fuera de estas temperaturas. La temperatura en la cámara digestiva debe ser entre los 20°C y 60° C; para optimizar el tiempo de producción es deseable mantener una temperatura entre los 30° C y 35° C.

El nivel de acidez determina como se desenvuelve la fermentación del material orgánico. El pH del material debe tener un valor entre 6.5 y 7.5. Al estar fuera de este rango neutro la materia orgánica corre el riesgo de pudrirse, ya que se aumenta la actividad relativa de los microorganismos equivocados; esto normalmente produce un olor muy desagradable.

El contenedor debe de estar perfectamente sellado para evitar que entre el oxígeno y de esta manera tener un procedimiento anaeróbico adecuado; también evita fugas del biogás.

Debe de contener entre el 80% y 90% de humedad.

Los materiales más comúnmente utilizados para producir biogás son el estiércol de vaca, caballo, puerco y humana, sin embargo también se pueden otros materiales orgánicos.

Para lograr una descomposición eficiente, la materia orgánica debe de ser en tamaños digeribles pues entre más chica más rápida la producción del biogás.

Se deberá tener un equilibrio del carbono y el nitrógeno.

La Estructura de un biodigestor, existen muchas variaciones en el diseño del biodigestor. Algunos elementos que comúnmente se incorporan son:

Cámara de fermentación: El espacio donde se almacena la biomasa durante el proceso de descomposición.

Cámara de almacén de gas: El espacio donde se acumula el biogás antes de ser extraído.

Pila de carga: La entrada donde se coloca la biomasa.

Pila de descarga: La salida, sirve para retirar los residuos que están gastados y ya no son útiles para el biogás, pero que se pueden utilizar como abono (bioabono).

Agitador: Desplaza los residuos que están en el fondo hacia arriba del biodigestor para aprovechar toda la biomasa.

Tubería de gas: La salida del biogás. Se puede conectar directamente a una estufa o se puede transportar por medio de la misma tubería a su lugar de aprovechamiento.

Las Ventajas y desventajas de los biodigestores.

Ventajas:

- Es una energía renovable y sustentable.
- Aprovecha la producción natural del biogás.
- Es posible utilizar los productos secundarios como abono o fertilizante.
- Evita el uso de leña local, así reduciendo la presión sobre los recursos forestales.
- Fomenta el desarrollo sustentable.
- Redirige y aprovecha los gases de efecto invernadero producidos por los vertederos y granjas industriales, lo cual reduce la huella de carbono de estos establecimientos y disminuye su contribución al cambio climático.
- Cumple con la normatividad nacional e internacional.
- Impide la contaminación de mantos acuíferos.
- Crea empleos especializados.
- Crea la posibilidad de incursionar un proyecto de vanguardia.

Desventajas, riesgos y consideraciones especiales:

- Idealmente, la ubicación debe de estar cerca de donde se recolecta la biomasa.
- La temperatura de la cámara de digestión debe mantenerse entre 20° C y 60° C; puede ser limitante en lugares extremos.
- El biogás contiene un subproducto llamado sulfato de hidrógeno, el cual es un gas corrosivo y toxico para los seres humanos.
- Al igual a cualquier otro gas combustible, existe el riesgo de explosión o incendios por un mal funcionamiento, mantenimiento o seguridad. (www.vlv.pe, 2015)

Los tipos de biodigestores, se pueden considerar de 3 tipos:

Discontinuo: Se cargan una sola vez y se retira cuando ya se ha dejado de producir gas, solo entonces se renueva de materia orgánica. Se usa cuando la disponibilidad de materia orgánica es limitada o intermitente.

Semi-continuo: Se cargan en lapsos cortos como de 12 horas, 1 vez al día, o cada dos días, se utiliza cuando la disponibilidad de materia orgánica es constante en los días. Los principales, son el Hindu, el Chino, y el Taiwanés, cada uno con ventajas y desventajas, como si se quiere aprovechar más el gas, o el biol, si se quiere usarlo para fines sanitarios o de producción, diversas ventajas que veremos más adelante.

Continuo: Se cargan continuamente, y principalmente tienen la finalidad de tratamiento de aguas negras, así como de producción a gran escala así como el uso de alta tecnología para el control, es sobre todo de corte industrial.

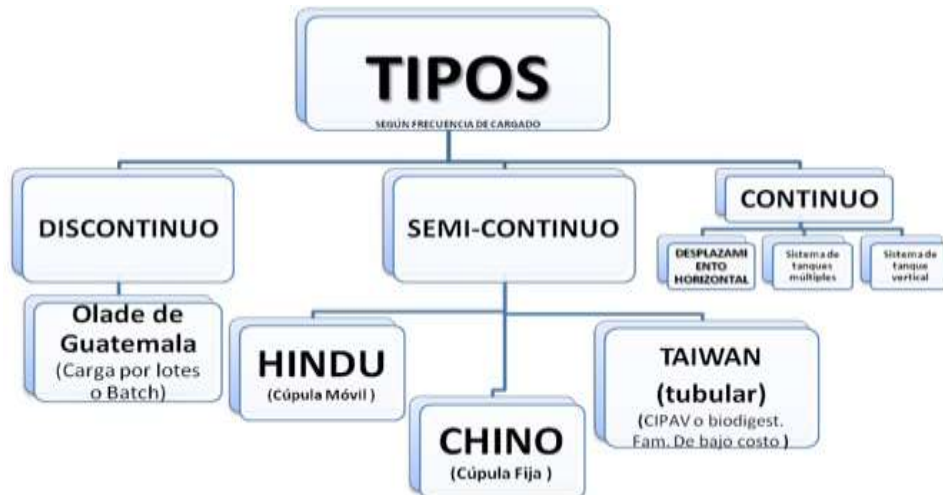


Figura 10. Tipos de Biodigestor según su forma de Operación y Frecuencia de Carga
Fuente: <http://cienciasseptimodosmiravalle.blogspot.com/>

Según Guevara (1996), menciona que existen varios modelos de biodigestores, y entre los más habituales se tiene: El modelo chino, el modelo indio, el modelo batch o por lotes y los modelos horizontales, en estos últimos se pueden encontrar los rectangulares y tubulares de plástico, que se construyen con materiales que van desde plásticos prefabricados hasta polietileno.

Modelo Chino.

Guevara (1996) refiere que:

Este modelo mostrado en la figura 10 está muy difundido en China, más de cinco millones de biodigestores se han construido en el país, pero desgraciadamente, la tecnología no ha sido tan popular fuera de éste. Este modelo corresponde a un digestor de cúpula fija en forma cilíndrica, enterrado con cámaras de hidropresión. La estructura puede ser de hormigón, de ladrillo, bloques, adobes y se les puede adicionar el gasómetro externo. Este digestor por estar enterrado favorece el proceso fermentativo, con poca influencia por los cambios de temperatura, la desventaja que presenta es que la presión del gas es variable dependiendo del volumen acumulado.
(p. 26)

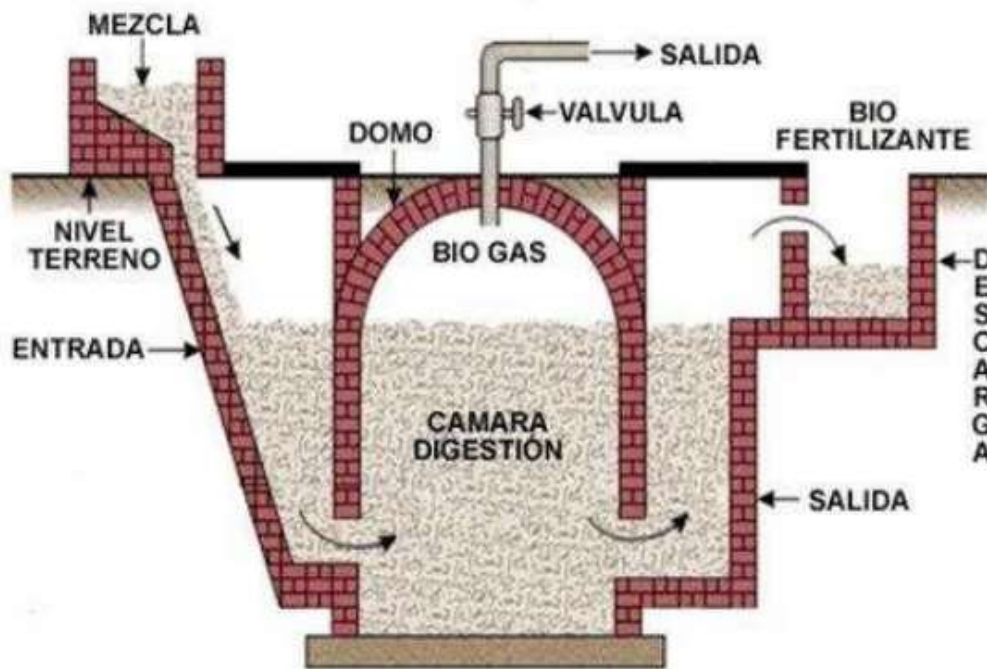


Figura 11. Modelo de biodigestor chino
 Fuente: Diseño de un biodigestor para mejorar la obtención de biogás y biol. Taipe (2019)

Modelo Hindú.

Guevara (1996) refiere que:

Este modelo mostrado en la figura 11, es originario de India y se ha difundido mucho debido a la presión de trabajo constante que se logra en el proceso, generalmente son verticales, con el gasómetro incorporado por lo que llama digestor de Cúpula Móvil, la estructura se construye de bloques y concreto, el gasómetro es de acero, lo que lo hace costoso. El gasómetro posee una camisa que se desliza en un eje y lo mantiene centrado para que no roce con las paredes ni se oxide, este eje descansa en una viga transversal de concreto armado enjaulado. Estos digestores son de alimentación continua, se construyen generalmente enterrados quedando la cúpula sin gas en un nivel cercano a la superficie del terreno. (p. 27)

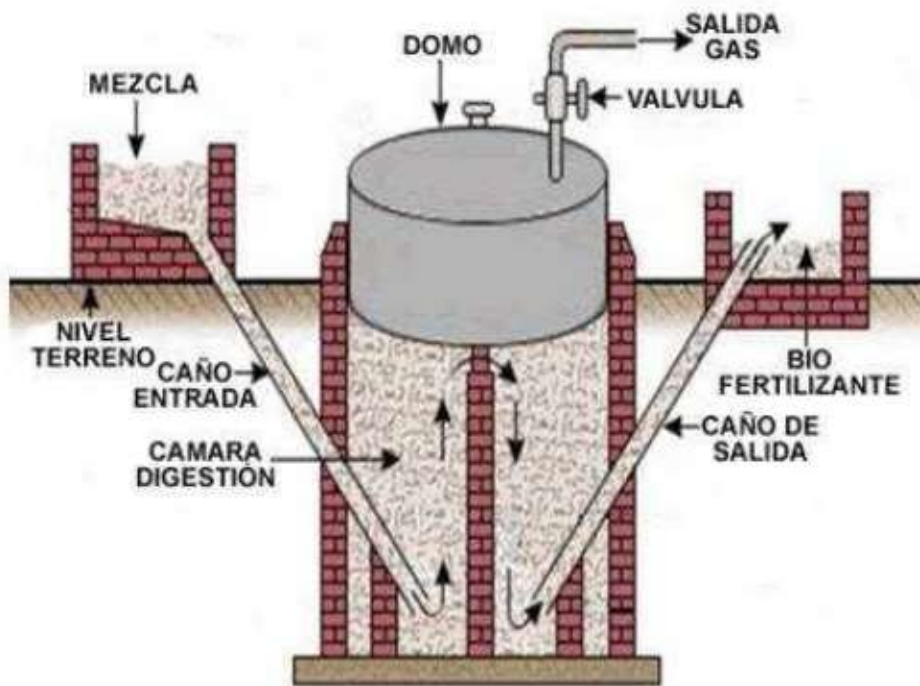


Figura 12. Modelo de biodigestor Hindú.

Fuente: Diseño de un biodigestor para mejorar la obtención de biogás y biol. Taipe (2019)

Modelos Horizontales

Guevara (1996) refiere que:

Se habla de digestor horizontal cuando estos no profundizan en el suelo, son de forma rectangular aunque pueden ser cuadrados, se caracterizan por ser en su mayoría de concreto armado debido a las presiones a que están sometidos (mostrado en la figura 12).

Su uso es generalmente para el saneamiento de descargas cloacales, ya que su conformación alargada garantiza que el efluente al salir del cuerpo del digestor, debido al flujo pistón y al tiempo de retención sea debidamente degradado. Estos digestores llevan generalmente en la parte superior una pequeña cúpula metálica desmontable que sirve de boca de visita, la presión se controla por el sello de agua, además requiere gasómetro adicional debido a la poca capacidad de almacenamiento de la cúpula y el cuerpo del digestor. (p. 28)

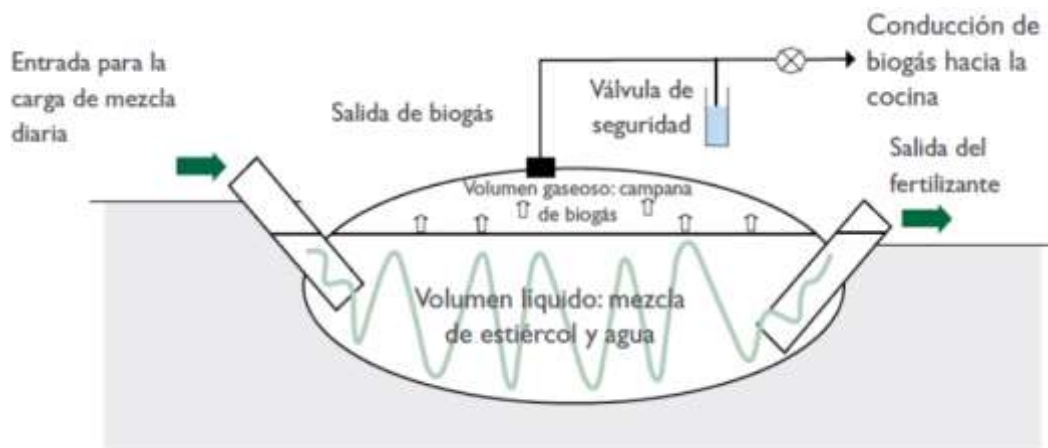


Figura 13. Modelo de biodigestor horizontal de estructura flexible
 Fuente: Diseño de un biodigestor para mejorar la obtención de biogás y biol. Taipei (2019)

Modelos Batch por lotes.

Guevara (1996) refiere que:

Estos biodigestores se caracterizan por que se cargan una sola vez, presentan una cúpula metálica con sello de agua, la estructura se construye con bloques y concreto reforzado (mostrado en la figura 13); este modelo presenta la desventaja que se debe construir obligatoriamente un gasómetro y al ser aéreo está afectado por la temperatura ambiental.

Se utiliza para degradar materias primas sólidas, como restos vegetales, desechos orgánicos, entre otros. El rendimiento volumétrico de gas es superior a cualquier digestor continuo, igualmente ocurre con el abono sólido resultante; por eso este método permite el tratamiento sanitario de desperdicios orgánicos, el control satisfactorio de toda clase de plagas, así como la proliferación de moscas, permite la recuperación eficiente y económica del metano y la retención de humus e ingredientes para uso de fertilizantes. (p. 29)



Figura 14. Modelo biodigestor de Batch.

Fuente: Diseño de un biodigestor para mejorar la obtención de biogás y biol. Taipe (2019)

Agitación del digestor y producción de biogás

Aunque la importancia de la agitación de un digestor anaerobio para conseguir una buena mezcla, y en consecuencia alcanzar una producción de biogás eficiente ha sido señalada por muchos investigadores (Lee et al., 1995; Karim et al., 2005c), en otros casos se ha indicado que la agitación, incluso ausencia de la misma, no influye apenas en la producción de biogás (Ong et al., 2002), influye muy poco (Van Hulle et al. (2014) observaron una reducción del 10 % de la producción de metano para condiciones sin mezcla) incluso es positivo (Stroot et al., 2001 y Vavilin y Angelidaki, 2005).

Karim et al. (2005b) examinaron el efecto del tipo de agitación en la producción de biogás, y se encontraron con que los digestores agitados y sin agitar tenían una producción muy similar cuando se alimentaban con fango al 5 % procedente de estiércol, mientras que los digestores mezclados produjeron más biogás que las que sin mezclar cuando se alimentaron con los mismos fangos al 10 % y al 15 %. La agitación con gas era ineficaz para fangos con una concentración

superior al 15 %. Liao y Li (2015) también observaron resultados similares para altas concentraciones del fango. Así, observaron que para una concentración del fango superior al 12 %, si no había agitación, difícilmente se producía biogás.

Bridgeman (2012) observó que la producción de biogás en un digestor a escala de laboratorio mezclado mediante un agitador mecánico no se vio afectada por los cambios en la velocidad del agitador. Sin embargo, si afectó al volumen de zonas muertas, tal como se muestra en la figura 14, donde se observa el comportamiento que describe por los autores.

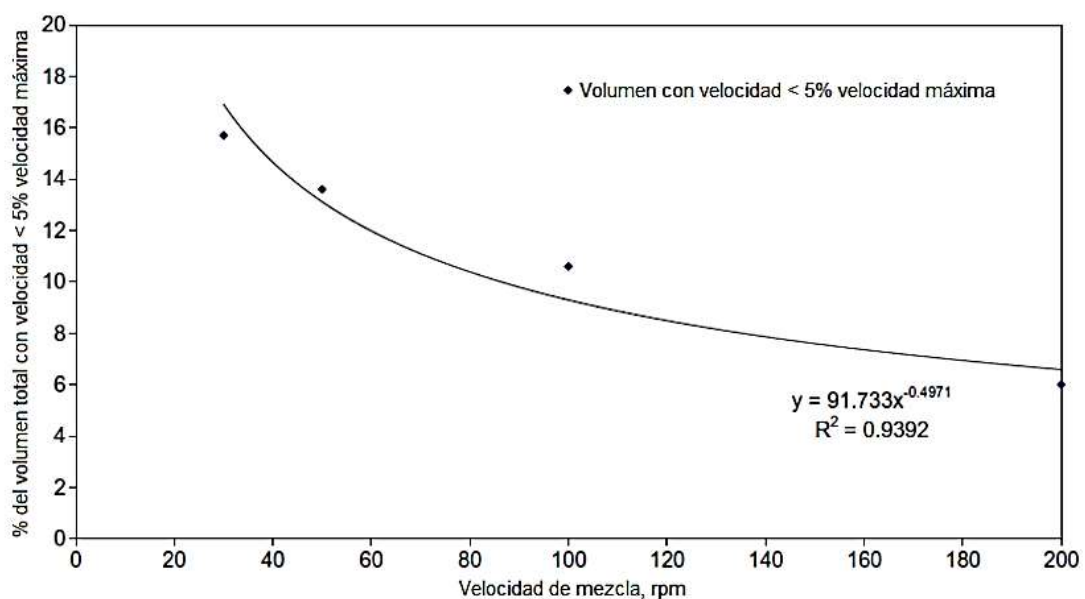


Figura 15. Influencia de la velocidad de la mezcla en el volumen de zonas muertas para fango digerido concentrado al 5,4 %
Fuente: Bridgeman, 2012.

Es importante destacar la investigación que realizaron Lindmark et al. (2014). En ella, compararon la tasa de producción de biogás (l metano/g sólidos volátiles del fango fresco) de diferentes investigaciones y con diferentes condiciones de agitación. Rico et al. (2011) apenas obtuvieron diferencia en la producción de biogás cuando en el digestor agitado mediante una bomba de su planta piloto la bomba funcionó en continuo o de manera intermitente. Kaparaju et al. (2008) obtuvieron resultados similares en sus ensayos con digestores mezclados con agitadores mecánicos a escala de laboratorio, escala planta piloto y ensayos batch, aunque sus resultados no se pueden considerar como concluyentes debido a la disparidad de resultados. Stroot et

al., (2001) observaron como la producción de biogás aumentaba cuando en digestores a escala de laboratorio (0,5 l y 1 l de volumen), agitados de manera mecánica, la mezcla se realizaba de manera intermitente. Ong et al. (2002) y Hoffman et al. (2008) obtuvieron la misma producción de biogás independientemente de la velocidad de giro del agitador mecánico.

Lin y Pearce (1991) produjeron más biogás cuando sus digestores de 7 litros se agitaron que cuando permanecieron en reposo. Sin embargo, la velocidad del agitador mecánico no influyó en la producción de biogás. Chen Jiaja et al. (2011) aumentó la producción de biogás de sus digestores de 90 l con el incremento de la velocidad de giro del agitador. Hashimoto (1982) no obtuvo resultados concluyentes en sus ensayos a nivel de laboratorio, mientras que en los realizados en la planta piloto la producción de biogás fue la misma para la agitación en continuo que de manera intermitente. En todos los casos, la agitación fue mecánica.

Entonces después de una revisión de las teorías relacionadas al problema, nos planteamos la siguiente hipótesis de investigación:

La producción de biogás mejora mediante el diseño y selección de un agitador mecánico para un biodigestor semi continuo en la I.E.P.C. BERESHI – Chimbote.

La operacionalización de las variables, la definición conceptual y la definición operaciona de mi trabajo de investigación es la que a continuación detallo:

Variable Dependiente: *Producción de biogás*

Definición conceptual.- El biogás es una mezcla de gases cuyos principales componentes son el metano y el bióxido de carbono, el cual se produce como resultado de la fermentación de la materia orgánica en ausencia del aire, por la acción de un grupo de microorganismos.

En la naturaleza se encuentra una gran variedad de residuos orgánicos a partir de los cuales puede obtenerse biogás, entre ellos se encuentran: los desechos provenientes de animales domésticos como vacas, cerdos y aves, residuos vegetales como pajas, pastos, hojas secas y basuras domésticas.

Definición operacional: La producción de biogás será a través de la descomposición de los desechos inorgánicos del cuy y conejo, los cuales son criados en la propia institución. La producción va de la mano con la materia prima que vamos a utilizar para la combustión, es decir uso exclusivo de la cocina de la institución, y dar así con el biogás una alternativa al uso de combustible tradicional.

Variable Independiente: *Agitador mecánico*

Definición conceptual: Un agitador instalado en un tanque de digestión suspende el material orgánico y evita la formación de una película flotante o costra. El objetivo del agitador es crear una recirculación vertical de abajo a arriba, para ello y debido al gran tamaño de los digestores se coloca un agitador vertical con 2 hélices, una en la parte de abajo y la otra en la superficie del fluido

La hélice situada en la superficie del fluido es la que va a evitar la formación de la costra, que puede ser peligrosa ya que hace que el metano no vaya a la superficie del reactor

Definición operacional: Es un conjunto de componentes cuya función es hacer girar o remover los desechos que se encuentran en el biodigestor con la finalidad de mejorar la producción del biogás y hacer más eficiente la descomposición de los excrementos.

Definido entonces las variables de estudio nos planteamos los objetivos de nuestro trabajo de investigación.

El objetivo general de mi trabajo de investigación se ha planteado de la siguiente manera: Diseñar e implementar un agitador mecánico para mejorar la producción de gas de un biodigestor semi continuo en la I.E.P.C. BERESHIT-Chimbote.

Para lo cual fue necesario plantear los siguientes objetivos específicos

- Evaluar los parámetros geométricos y las características de la materia prima de operación del biodigestor para mejorar la producción de gas.

- Realizar el diseño y selección del agitador mecánico del biodigestor para mejorar la producción de gas.
- Determinar los componentes del sistema de agitación mecánica del biodigestor para mejorar la producción de gas
- Realizar la simulación numérica para evaluar el pandeo en los alabes del agitador mecánico del biodigestor

II.- Metodología

2.1 Tipo y diseño de investigación.

Tipo: Es de tipo descriptivo con una propuesta de cuantitativa ya que tiene como finalidad recolectar datos.

Diseño: Es una investigación no experimental transversal, puesto que el objetivo de análisis es una realidad observable, medible y no se modifica la variable.

Es una investigación de diseño descriptivo - transversal, constituye un tipo de investigación cuantitativa, que busca establecer las distintas causas de un fenómeno, comportamiento o proceso

Además se utilizara la recolección y el análisis de datos para contestar preguntas de investigación y probar la hipótesis establecida previamente, se apoya en el conteo, para establecer con exactitud patrones de comportamientos en una población (Hernández, Fernández y Baptista, 2003, p. 12).

El esquema que representa a este diseño es:



Dónde:

M = Muestra

O1 = Primera Observación de la Muestra

O2 = Segunda Observación de la Muestra

2.2 Población y Muestra:

Para Hernández, Fernández y Baptista (2010), la “población es el conjunto que concuerdan con determinadas especificaciones y la muestra es el subgrupo de la población del cual se recolectan los datos” (p. 173).

La unidad de observación es el biodigestor tipo chino que produce biogás, este fue seleccionado intencionalmente porque el funcionamiento del biodigestor tiene problemas de continuidad de producción de biogás por ello centramos la investigación en el equipo y planteamos una alternativa de solución, que es proponer la implementación de un agitador mecánico, para uniformizar y mejorar la obtención de biogás.

En tal sentido el caso de la población y muestra de la unidad de observación, se trata de un estudio de caso único (no probabilístico), porque se seleccionó intencionalmente el biodigestor tipo chino que se encuentra en la Institución Educativa Privada Cristiana Bereshi, ubicada en la zona rural del sector La Perla en Chimbote, provincia del Santa del departamento de Ancash.

2.3 Técnicas e instrumentos de investigación:

2.3.1. Observación, es el método fundamental de obtención de datos de la realidad de un objeto o de un fenómeno determinado, el cual tiene como ventaja principal, que los datos se recogen directamente de los objetos o fenómenos percibidos mediante registros caracterizados por la sistematicidad.

2.3.2. Investigación, basados en la recopilación de información (física o virtual) que logremos encontrar nos proporcionara ayuda suficiente para lograr encaminarnos con el propósito de culminar la investigación y poder realizar nuestros sondeos a la población destinada del presente proyecto.

2.3.3. Documentación, nos servirá de gran ayuda para la recopilación de información en documentos que nos permita seleccionar, almacenar, difundir y transferir información afines a la investigación

2.3.4.- Instrumentos:

Entrevistas: con la autoridad de la Institución Educativa Privada Cristiana Bereshi

Estadística de producción de biogás: se solicitó información de las estadísticas de la producción de biogás de los meses anteriores.

Planos de Zona: se solicitó a la Institución Educativa Privada Cristiana Bereshi respecto a los planos del equipo biodigestor.

III.- Resultados

3.1 Determinación de los parámetros de operación del biodigestor

Parámetros Geométricos

Se verifico los parámetros geométricos de biodigestor que se encuentra instalado en La Institución Educativa Privada Cristiana Bereshi, ubicada en Parcela 7, Tres Cabezas, Sector La Perla, Chimbote-Ancash.

Estos parámetros geométricos se midieron por la parte interna del equipo, para ello se esperó al periodo de mantenimiento del biodigestor para tener la posibilidad de ingresar, las cuales consistieron en el radio de la base y las alturas correspondientes del equipo, según mostrado en la figura 15, cuyos valores se muestran en la tabla 3.

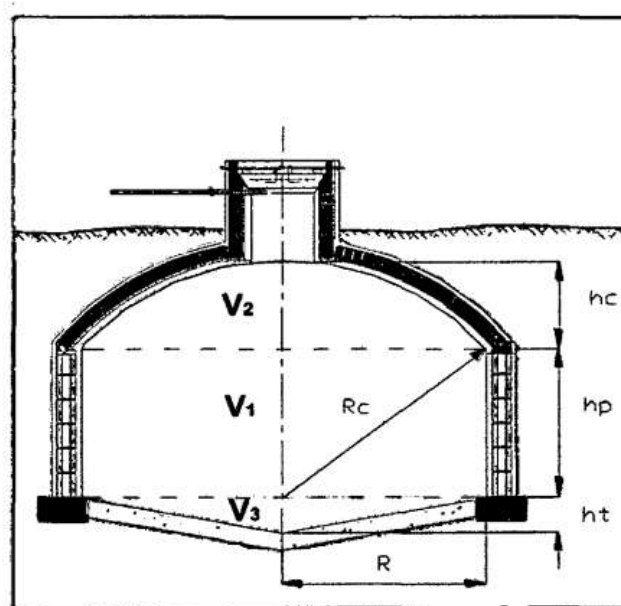


Figura 16. Esquema del Biodigestor tipo Chino
Fuente: Rodríguez Ponce, 2013.

Es importante resaltar que se verifico que el fondo es tipo cono de base circular y la tapa del estanque es cuadrada, tal como se puede apreciar en las imágenes mostradas en el Anexo A.

Con estos valores de determino los correspondientes volúmenes del equipo, como son de la campana, del biodigestor y de la base, contrastando los valores obtenidos por Arquíño (2015), el cual se muestran en la tabla 4.

Tabla 4*Parámetros geométricos del biodigestor tipo chino*

Parámetro geométrico	Cantidad	unidad
Radio base (R)	0.8	m
Altura de campana (hc)	0.4	m
Altura de la pared (hp)	1.0	m
Altura del cono de base (ht)	0.24	m
Volumen de la campana (V ₂)	0.54	m ³
Volumen del biodigestor (V ₁)	1.57	m ³
Volumen de la base (V ₃)	0.16	m ³

Fuente: Elaboración propia

Parámetros característicos de la materia prima

De acuerdo a la cantidad de animales que se dispone en la institución (35 conejos y 40 cuyes) el excremento que se tiene a disposición es:

Cantidad de estiércol de conejo: 4.2 kg /día

Cantidad de estiércol de cuy: 5.6 kg/día

$$M_e = M_{e,\text{conejo}} + M_{e,\text{cuy}}$$

$$M_e = 4.2 \text{ kg/día} + 5.6 \text{ kg/día}$$

$$M_e = 9.8 \text{ kg/día}$$

Para la mezcla de estiércol de cuy y conejo se requiere agua que se considera según las referencias bibliográficas en una proporción de 1:3, es decir la mezcla usara por 1 kg de estiércol y 3 kg de agua. Entonces la cantidad de agua en volumen (V_a) será:

$$V_a = \text{masa agua} / \text{densidad del agua}$$

$$V_a = \frac{3 * (4.2 + 5.6) \text{ kg agua}}{1000 \frac{\text{kg de agua}}{\text{m}^3 \text{ de agua}}} = 0.0294 \text{ m}^3 \text{ de agua}$$

$$V_a = 29.4 \text{ litros de agua}$$

Considerando la densidad del agua 1000 kg/m^3 (a $15.5 \text{ }^\circ\text{C}$ y 1 atmosfera), finalmente de acuerdo a la relación de 1:3, la mezcla total en masa será: 39.2 kg de mezcla.

3.2 Diseño y selección del agitador mecánico para el biodigestor

Selección del tipo de agitador mecánico

Para la selección del tipo de agitador en el trabajo de **Penny (1970)** propone la figura 16, para el uso de esta grafica se requiere el volumen del tanque en m^3 (eje de abscisas) y la viscosidad del fluido en kg/m.s (eje de ordenada).

En nuestro trabajo:

La viscosidad dinámica y la densidad de la mezcla (excremento de cuy y conejo más agua) es 0.0046 kg/m.s y 1019 kg/m^3 , respectivamente.

El volumen del tanque se considera el volumen del biodigestor (V_1) y el volumen de la base (V_3), según mostrado en la figura 15 y calculado en la tabla 4, entonces:

$$V = V_1 + V_3 = 1.57 + 0.16 = 1.73 \text{ m}^3$$

Con estos datos se ingresa al gráfico de la figura 16 y se interseca los valores correspondientes, según la gráfica indica que se debe usar un agitador con alabes tipo turbina, es importante notar que el régimen de giro para el rotor del agitador es de 1750 rpm pero puede ser también para un valor de 1150 rpm , pues está muy cercano a esa franja.

Finalmente el régimen e giro será ser calculado en función de los parámetros dados y con ello se verificara si cumple o no con el requerimiento del rotor.

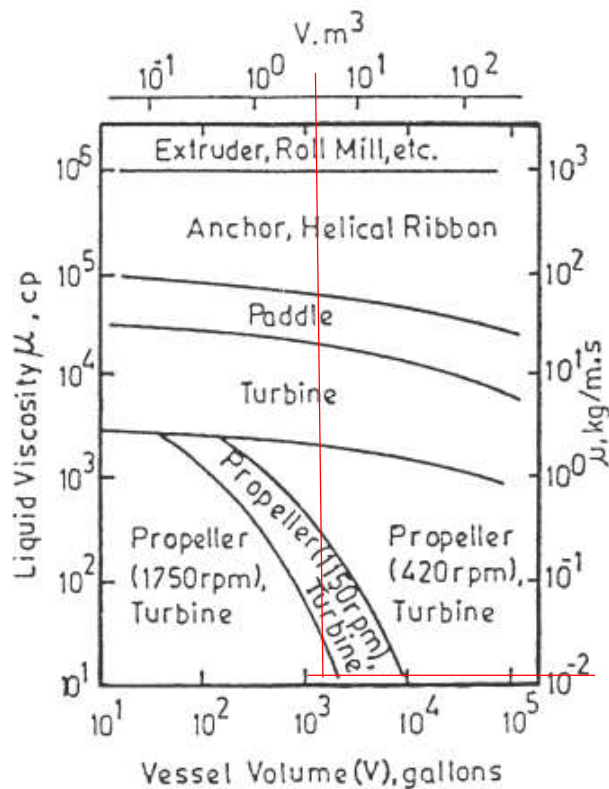


Figura 17. Selección del tipo de Rotor del Agitador
Fuente: Penny, W. A. R. (1970). Guide to Trouble-free Mixers.

Por ende, se decidió utilizar un agitador tipo turbina de aspas inclinadas 45° ya que generan un patrón de flujo mixto y ordenado, además son especialmente eficaces para el intercambio de calor de los componentes de la mezcla con las paredes.

Determinación de la configuración del sistema de agitación

Existen diferentes tipos de tanques de diferentes formas y tamaños geométricos que se utilizan para el mezclado de fluidos. En la figura 17 se muestra la configuración estándar de un tanque de mezcla.

Estas variables afectarán y determinarán las necesidades y objetivos particulares de lo que se requiere, como por ejemplo en nuestra investigación: La velocidad de circulación de la mezcla, modelo de flujo, consumo de potencia, etc. Como punto de partida en el diseño de un agitador se pueden utilizar las proporciones geométricas estandarizadas que relacionan las medidas generales del estanque con el tipo de impulsor.

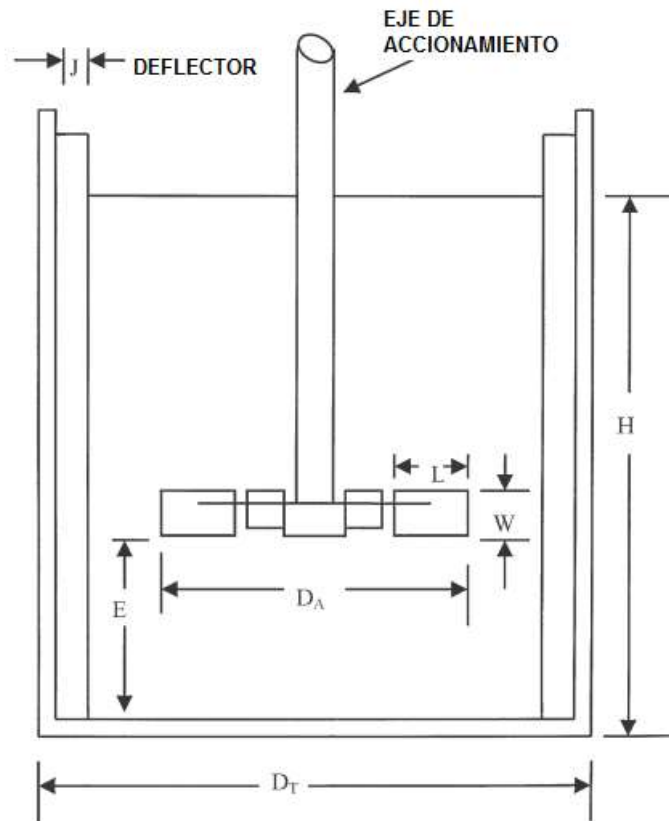


Figura 18. Configuración estándar de un Tanque de mezcla.
 Fuente: Penny, W. A. R. (1970). Guide to Trouble-free Mixers.

En la figura 17 muestra las variables geométricas estandarizadas que se deben considerar en el diseño del agitador, para la configuración mostrada la tabla 5 muestra las proporciones geométricas de estas dimensiones para un sistema de agitación estándar que será utilizado en el diseño del agitador.

Tabla 5

Proporciones geométricas de un sistema de agitación estándar

$\frac{D_A}{D_T} = \frac{1}{3}$	$\frac{H}{D_T} = 1$	$\frac{J}{D_T} = \frac{1}{12}$
$\frac{E}{D_A} = 1$	$\frac{W}{D_A} = \frac{1}{5}$	$\frac{L}{D_A} = \frac{1}{4}$

Fuente: Penny, W. A. R. (1970). Guide to Trouble-free Mixers.

D_A = Diámetro del agitador

H = Altura del líquido o mezcla

D_T = Diámetro del tanque

E = Distancia del fondo del tanque hasta el agitador o rodete

J = Ancho del deflector

L = Longitud del alabe del agitador o rodete

W = Ancho del alabe del agitador o rodete

De acuerdo a estos parámetros el agitador tendrá las siguientes dimensiones en el tanque:

Diámetro del agitador:

$$D_A = \frac{1}{3} \times D_T = \frac{1}{3} \times 1.6 \text{ m} = 0.533 \text{ m} = 53.3 \text{ cm}$$

Distancia del fondo del tanque hasta el agitador o rodete:

$$E = D_A = 53.3 \text{ cm}$$

Altura del líquido o mezcla:

$$H = D_T = 1.6 \text{ m}$$

Aquí debemos indicar que la altura de mezcla H es mayor que la altura del tanque que es de 1.24 m, así que no hay ningún problema pues eso garantizara una mejor eficiencia de mezclado cuando trabaje el agitador.

Ancho del alabe del agitador o rodete:

$$W = \frac{1}{5} \times D_A = \frac{1}{5} \times 53.3 \text{ cm} = 10.7 \text{ cm}$$

Ancho del deflector:

$$J = \frac{1}{12} \times D_T = \frac{1}{12} \times 1.6 \text{ m} = 0.133 \text{ m} = 13.3 \text{ cm}$$

Por lo general, se utilizan 4 deflectores y el espacio libre entre los deflectores y la pared hay alrededor de 0.1–0.15 J. Esto asegura que la mezcla no forme bolsas estancadas entre el deflector y la pared.

Longitud del alabe del agitador o rodete:

$$L = \frac{1}{4} \times D_A = \frac{1}{4} \times 53.3 \text{ cm} = 13.3 \text{ cm}$$

Para determinar el número de agitadores o rodets necesarios y la elevación desde el fondo requerido en nuestro sistema utilizaremos los parámetros mostrados en la tabla 6, la relación entre la altura de líquido o mezcla y el diámetro del tanque (H/D_T), donde la nomenclatura equivalente es $Z=H$ y $D_T=T$.

Entonces $Z = 1.24$ m y $T = 1.6$ m de ello tenemos $Z/T = 0.8$ para el uso de la tabla 6 consideramos la mezcla que se desea agitar son sólidos en suspensión y el valor que más se aproxima es a $Z/T = 1.2$ con ello el número de agitadores es 1.

Correspondientemente la elevación del agitador desde el fondo del tanque será $Z/4 = 1.24/4 = 0.31$ m = 31 cm

Tabla 6

Número de agitadores o rodets necesarios y la elevación desde el fondo.

Mixing System	Maximum Liquid Height, Z/T	Number of Impellers	Impeller Elevation from Tank Bottom	
			Bottom	Top
Liquid blending	1.4	1	Z/3	—
	2.1	2	T/3	2 Z/3
Solids suspension	1.2	1	Z/4	—
Gas dispersion	1.8	2	T/4	2 Z/3
	1.0	1	T/6	—
	1.8	2	T/6	2 Z/3

Fuente: Paul, Atiemo-Obeng y Kresta, 2004.

Determinación de la potencia requerida por el motor

La potencia consumida por un agitador (P) varía con respecto al diámetro del agitador, la gravedad, (g) la viscosidad del fluido (μ), la densidad (ρ), la velocidad de rotación del agitador (N), el diámetro del tanque, el ancho de las aspas y la altura del líquido.

Esta expresión se muestra detallada en la ecuación (1):

$$N_p = K \{ Re^{-b} Fr^{-d} \left(\frac{D_T}{D_A} \right)^f \left(\frac{W}{D_A} \right)^g \left(\frac{H}{D_A} \right)^h \} \quad (1)$$

Donde:

N_p : Número de potencia

Re : Número de Reynolds

Fr : Número de Froude

Es importante resaltar que Rushton et al. (1950) realizaron extensas mediciones de los requisitos de energía para sistemas geoméricamente similares y encontraron que para tanques con deflectores, el número de Froude no juega ningún papel en la determinación de los requisitos de potencia, ya que no se forman vórtices en tales sistemas (Coker, 2001).

Cálculo del Número de Reynolds y Número de Potencia del agitador

Consideramos que el tiempo de mezcla deseado $\Theta = 300$ segundos, es decir que garantizaremos que en 5 minutos la mezcla ya se encuentra uniformemente mezclado.

Reemplazando en la ecuación (2) tenemos:

$$\frac{1}{Fo} = \frac{\rho * D_T^2}{\mu * \theta}$$

Donde

Fo es el número de Fourier

$$\frac{1}{Fo} = \frac{1019 \text{ kg/m}^3 * (1.6 \text{ m})^2}{0.0046 \text{ Pa/m.s} * 300 \text{ s}} = 1890.3$$

Según (Paul et.al. 2004, capítulo 9), como $1/Fo > 1225$ entonces el proceso de mezclado es en régimen turbulento.

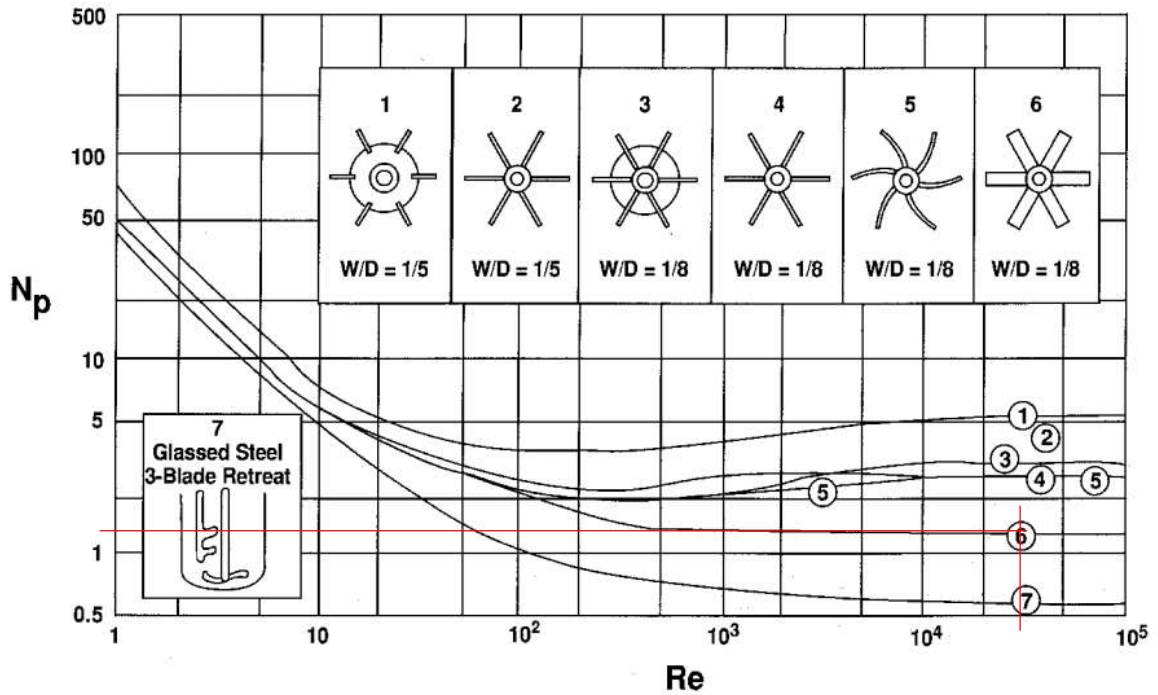


Figura 19. Número de potencia versus Número de Reynolds para diferentes tipos de agitadores tipo turbina (modificado de Rushton et al., 1950).
Fuente: (Paul et.al. 2004)

Según la gráfica de la figura el tipo de agitador usado es de tipo turbina de alabes inclinados, correspondiente a la clase número 6. Asumiremos un número de potencia de entrada igual a 1.5 (el cual será ajustado con el número de Reynolds). Con el ecuación (3) determinamos el parámetro:

$$Po^{1/3} Re = \frac{9.19}{Fo} = 9.19 * 1890.3 = 17\ 372.0$$

Entonces ahora determinamos el número de Reynolds con la siguiente ecuación (3):

$$Re = \frac{58\ 136}{Po^{1/3}} = \frac{58\ 136}{1.5^{1/3}} = 50\ 786.5$$

$$Re = 5.1 \times 10^4$$

Con este valor volvemos a la gráfica y determinamos el verdadero valor del número de potencia, según la gráfica de la figura 4 este valor es $Po = 1.40$.

Ahora para confirmar el nuevo valor del número de Reynolds recalculamos en la ecuación (3) y obtenemos $51\,968 = 5.2 \times 10^4$ el cual es aproximadamente el mismo valor, entonces ya nos es necesario otra iteración.

Calculo de la velocidad de rotación del agitador o rotor:

Para determinar la velocidad de rotación usaremos la ecuación (4):

$$N = \frac{Re \cdot \mu}{\rho \cdot D^2}$$

Reemplazando en la ecuación tenemos:

$$N = \frac{Re \cdot \mu}{\rho \cdot D^2} = \frac{51968 \times 0.0046}{1019 \times 0.533^2} = 0.825 \text{ rps}$$

$$N = 0.825 \times 60 = 49.6 \text{ rpm}$$

Según la tabla mostrada se encuentra entre 45 a 56 rpm, consideraremos el valor mayor, es decir 56 rpm para garantizar la óptima homogenización de la mezcla.

Tabla 7

Potencia de motor estándar y velocidad de mezclado.

Motor Power (hp)						Mixer Speed (rpm)					
$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	1	$1\frac{1}{2}$	2	3	4	5	6	$7\frac{1}{2}$	9	11
5	$7\frac{1}{2}$	10	15	20	25	$13\frac{1}{2}$	$16\frac{1}{2}$	20	25	30	37
30	40	50	60	75	100	45	56	68	84	100	125
125	150	200	250	300	350	155	190	230	280	350	
400	500	600									

Fuente: (Paul et.al. 2004)

Cálculo de la potencia requerida por el agitador

Para determinar la potencia requerida por el agitador usaremos la ecuación (5):

$$P = P_o \rho N^3 D_A^5 \tag{5}$$

Reemplazamos los valores ya determinados:

$$P = 1.5 \times 10^{19} \text{ kg/m}^3 \times \left(\frac{56}{60}\right)^3 \text{ s}^{-3} \times 0.533^5 \text{ m}^5 = 53.5 \text{ Watt}$$

Consideraciones:

Eficiencia del motor = 0.7

Pérdidas por fricción = 35%

Entonces:

$$P = \frac{53.5 * 1.35}{0.7} = 103.1 \text{ W} = 0.14 \text{ HP}$$

Entonces se requiere un motor de ¼ HP, cuyas características técnicas se muestran en el Anexo D.

Cálculo del diámetro del eje de transmisión

Se utilizó la ecuación (7) para determinar el diámetro de un eje sometido a torque constante y flexión completamente reversible (Norton, 2013).

$$d = \left\{ \frac{32 N_f}{\pi} \left[\left(k_f \frac{M_a}{S_f} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T_m}{S_y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

En este caso, no existen fuerzas transversales aplicadas que causen flexión, por lo tanto, $M_a = 0$, y la ecuación (7) se reduce a:

$$d = \left\{ \frac{32 N_f}{\pi} \left[\frac{3}{4} \left(\frac{T_m}{S_y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}} = \left[\frac{16\sqrt{3} N_f}{\pi} \left(\frac{T_m}{S_y} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

$$P = T_m \omega \quad (9)$$

Dónde,

N_f : Factor de seguridad

P : Potencia requerida por el agitador

ω : Velocidad angular

T_m : Torque medio

Sy: Resistencia a la fluencia del material

Se escogió usar acero de transmisión AISI 1018, es un acero de cementación no aleado principalmente utilizado para la elaboración de piezas pequeñas, y un factor de seguridad de 3.0. Despejando el torque de la ecuación (9) se obtuvo:

$$T_m = \frac{P}{\omega}$$
$$T_m = \frac{50.0 \text{ W}}{\frac{56}{60} \text{ s}^{-1}}$$
$$T_m = 53.6 \text{ Nm}$$

Del catálogo del eje AISI 1018 se usó el valor del Punto de Fluencia, mostrado en el Anexo B: $S_y = 235 \times 10^6 \text{ Pa}$

Reemplazando los valores en la ecuación (8) tenemos:

$$d = \left[\frac{16x\sqrt{3}x(3.0)}{\pi} x \left(\frac{53.6 \text{ Nm}}{235 \times 10^6 \text{ Pa}} \right) \right]^{\frac{1}{3}}$$
$$d = 0.0182 \text{ m} = 1.82 \text{ cm}$$

Entonces consideramos un eje de acero, cuya medida comercial es de 1 pulgada de diámetro AISI 1018, especiales para transmisión mecánica.

Cálculo de la tasa de circulación interna

Los agitadores funcionan como bombas sin carcasa. La tasa de circulación interna, o flujo interno en el tanque, es la cantidad de flujo perpendicular al área de descarga del impulsor. Se la calculó mediante la ecuación (10).

$$Q = N_Q N D^3 \quad (10)$$

Dónde

N_Q es el número de flujo o número de bomba, el cual depende del tipo de agitador, la D_A/D_T y el número de Reynolds del agitador.

Los valores del número de bomba para los agitadores tipo turbina de aspas inclinadas se han obtenido experimentalmente.

En la figura 20 se muestra el número de flujo graficado según el número de Reynolds para distintas relaciones D_A/D_T para este tipo de agitador.

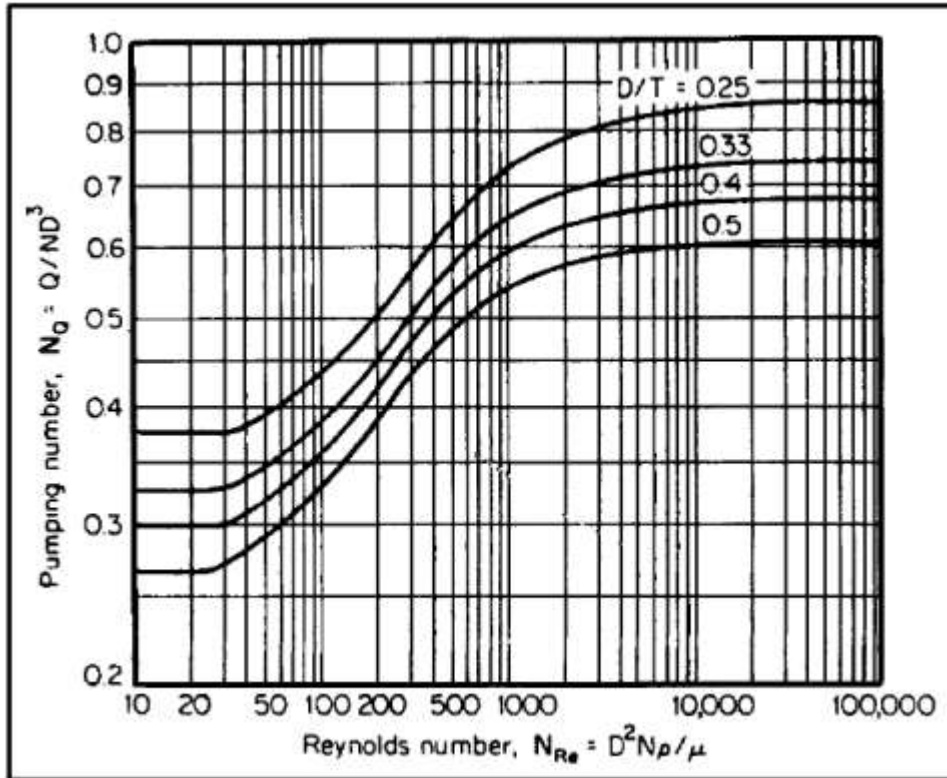


Figura 20. Número de flujo contra número de Reynolds para turbinas de aspas inclinadas.
Fuente: (Walas, 1990)

A partir de la figura 19 se obtuvo que el número de flujo para un agitador con un número de Reynolds de 4.6×10^5 y relación $D_A/D_T = 0.5$ es 0.55. Este dato se reemplazó junto con la velocidad de rotación y el diámetro del agitador en la ecuación (12).

$$Q = 0.55 * \left(56 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) * 0.533^3 \text{ m}^3 \quad (12)$$

$$Q = 0.078 \text{ m}^3/\text{s}$$

3.3 Determinación de los componentes del sistema de agitación mecánica del biodigestor

Podemos decir entonces que la tasa de circulación interna es baja debido a que estamos tratando una mezcla muy viscosa que no requiere una agitación elevada pero si constante e intermitente que asegure movimiento interno homogéneo.

En la figura 21 se muestra los componentes básicos para el montaje del conjunto biodigestor – agitador mecánico, donde se observa la base del motor eléctrico (1), el motor eléctrico, el eje rotor y sus acoplamientos mecánicos (2, 3, 4 y 5), el eje de salida del motor usado como transmisión mecánica (6), base del conjunto reductor de velocidad (7), el conjunto reductor de velocidad de giro, piñón de ataque de 30 dientes (12) y piñón corona de 90 dientes (11), eje del agitador mecánico (8), alabes o paletas del agitador (9), perno y tuerca (acero inoxidable) para la base del motor (13 y 14) y cuerpo de concreto armado del biodigestor (10).

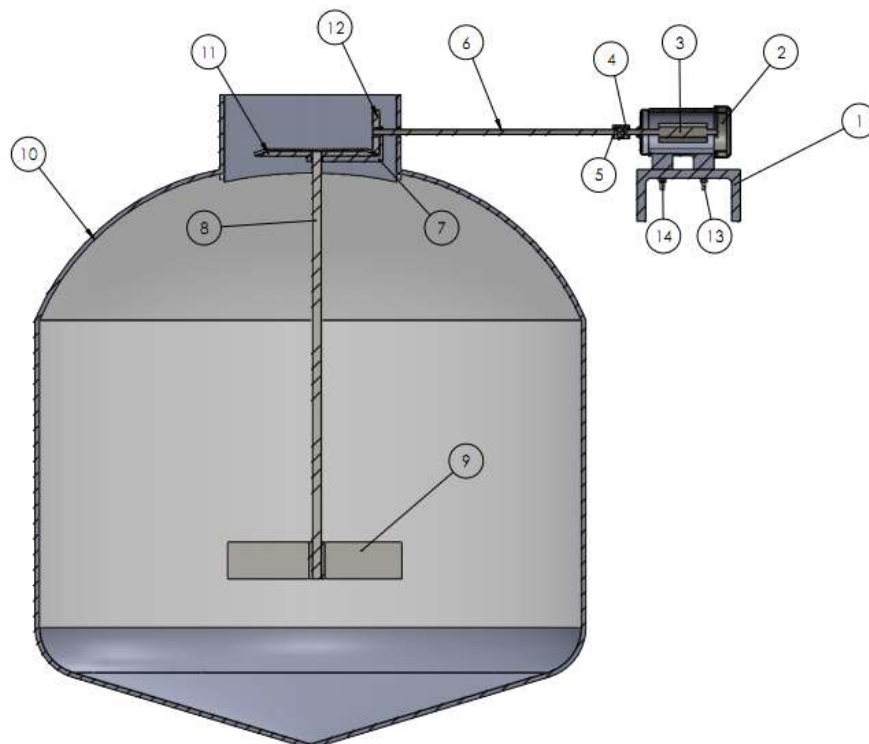


Figura 21. Diseño del conjunto Biodigestor – Agitador Mecánico
Fuente: Elaboración propia

Tabla 8*Componentes del conjunto Biodigestor – Agitador Mecánico*

N°	Tipo de pieza	Descripción del material	Cantidad
1	Base del motor eléctrico	AISI 1020	1
2	Montaje del motor	-	1
3	Eje rotor del motor electrico	AISI 4340	1
4	Acople 2	AISI 4130	1
5	Acople 1	AISI 4130	1
6	Eje de salida del motor	AISI 4340	1
7	Base del reductor de velocidad	AISI 1045	1
8	Eje del agitador	AISI 4340	1
9	Alabes o paletas del agitador	AISI 4130	1
10	Biodigestor	Concreto	1
11	Piñón corona de 90 dientes	AISI 4340	1
12	Piñón de ataque de 30 dientes	AISI 4340	1
13	Perno estructural M12, rosca parcial.	AISI 4340	4
14	Tuerca estructural M12	AISI 4340	4

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 8 se muestran los componentes necesarios para el sistema biodigestor - agitador mecánico, así como los materiales de cada uno de ellos.

3.4 Simulación Numérica del agitador mecánico del biodigestor

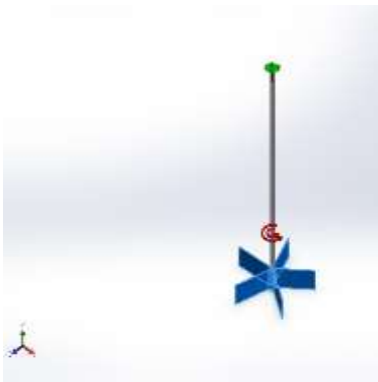
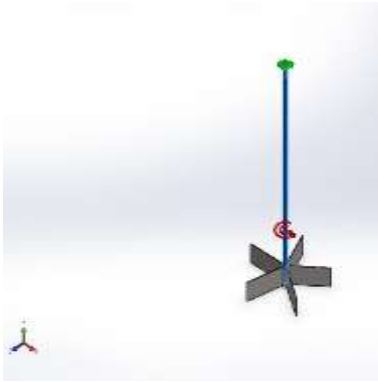
Análisis por el método de elementos finitos MEF.

Se empleó el análisis estático en el los alabes que se encuentran sujetos al eje del agitador mecánico, con la finalidad de observar en comportamiento el

pandeo en los alabes cuando se le aplica una carga centrífuga rotacional. Para el diseño y simulación se empleó el software SOLIDWORKS 2016 y su complemento Simulation el cual nos da las siguientes tablas de resultados.

Tabla 9

Propiedades del material de los alabes y eje del agitador mecánico

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: Acero al carbono no aleado</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Desconocido</p> <p>Límite elástico: 2.206e+008 N/m²</p> <p>Límite de tracción: 3.998e+008 N/m²</p> <p>Densidad: 7800 kg/m³</p> <p>Módulo elástico: 2.1e+011 N/m²</p> <p>Coefficiente de Poisson: 0.28</p> <p>Coefficiente de dilatación térmica: 1.3e-005 /Kelvin</p>	<p>Sólido 1(Saliente-Extruir3) (ALABE-1)</p>
Datos de curva:N/A		
	<p>Nombre: 1.7244 (18CrMoS4)</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Desconocido</p> <p>Límite elástico: 2.956e+008 N/m²</p> <p>Límite de tracción: 5.500e+008 N/m²</p> <p>Densidad: 7800 kg/m³</p> <p>Módulo elástico: 2.1e+011 N/m²</p> <p>Coefficiente de Poisson: 0.28</p> <p>Coefficiente de dilatación térmica: 1.1e-005 /Kelvin</p>	<p>Sólido 1(Cortar-Extruir3) (EJE BIODIGESTOR-1)</p>
Datos de curva:N/A		

Fuente: Elaboración propia/SOLIDWORKS-Simulation 2016

Tabla 10*Información de la malla*

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla estándar
Transición automática:	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla:	Desactivar
Puntos jacobianos	4 Puntos
Tamaño de elementos	12.5828 mm
Tolerancia	0.629141 mm
Trazado de calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Regenerar la malla de piezas fallidas con malla incompatible	Desactivar

Fuente: Elaboración propia/SOLIDWORKS-Simulation 2016

Tabla 11*Información de la malla - detalles*

Número total de nodos	17985
Número total de elementos	8948
Cociente máximo de aspecto	24.644
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	29.8
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	0.961
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:08
Nombre de computadora:	LENOVO-PC

Fuente: Elaboración propia/SOLIDWORKS-Simulation 2016

Este proceso es muy importante en la simulación, por ello una técnica muy útil para ahorrar tiempo consiste en realizar esta etapa de mallado antes de configurar los materiales, sujeciones y cargas, para probar si el conjunto alabes y eje del agitador mecánico, nuestro modelo a simular, es mallable o no debido a requiere mayor esfuerzo de configuración y verificación.

Se verifico el mallado de nuestro proyecto, cuyo tipo fue de malla sólida, luego cerciorándose de que nuestro modelo 3D no contenga interferencias y que la malla corra sin problemas, además que sea posible mallarlo con un número apropiado de elementos y nodos, en nuestro caso 8948 y 17985, respectivamente.



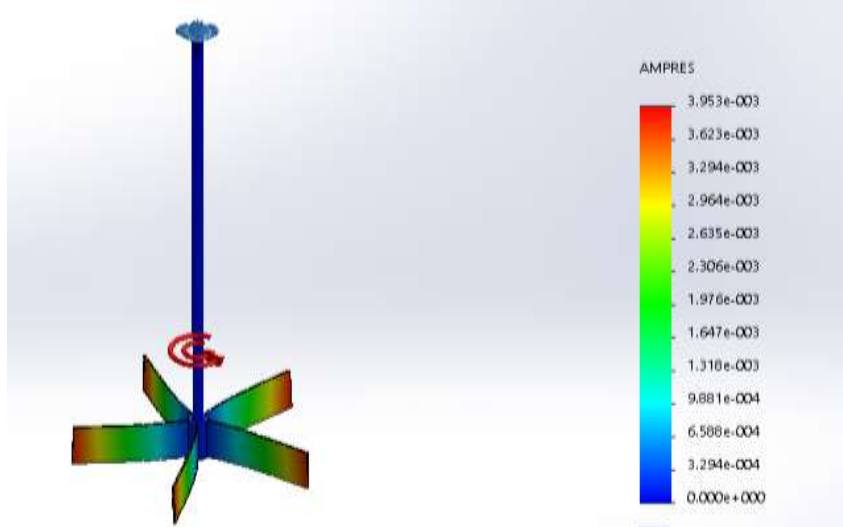
Figura 22. Mallado de conjunto alabes – eje del agitador mecanico
Fuente: Elaboración propia/SOLIDWORKS-Simulation 2016

Una vez verificado esto, se puede continuar con el resto de la configuración de la simulación obteniéndose el conjunto alabes – eje del agitador mecánico, como se puede observar en la figura 21.

Tabla 12

Resultados de análisis de Pandeo para 800 rpm

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Amplitud1	AMPRES: Amplitud resultante Plot para forma modal: 1 (Factor de carga = -0.378507)	0.000e+000 Nodo: 13705	3.953e-003 Nodo: 442



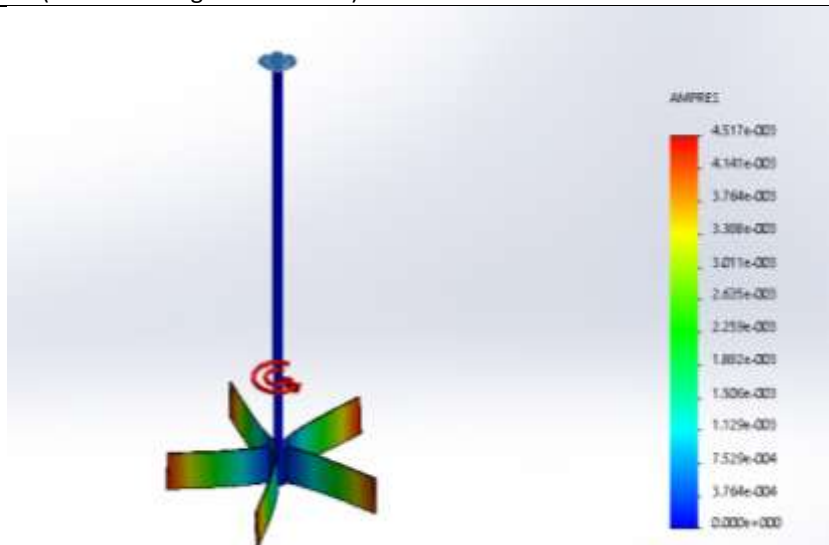
EQUIPO COMPLETOBIODIGESTOR. Analisis Estatico - Pandeo

Fuente: Elaboración propia/SOLIDWORKS-Simulation 2016

Tabla 13

Resultados de análisis de Pandeo para 700 rpm

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Amplitud1	AMPRES: Amplitud resultante Plot para forma modal: 1 (Factor de carga = -0.494377)	0.000e+000 Nodo: 13705	4.517e-003 Nodo: 442

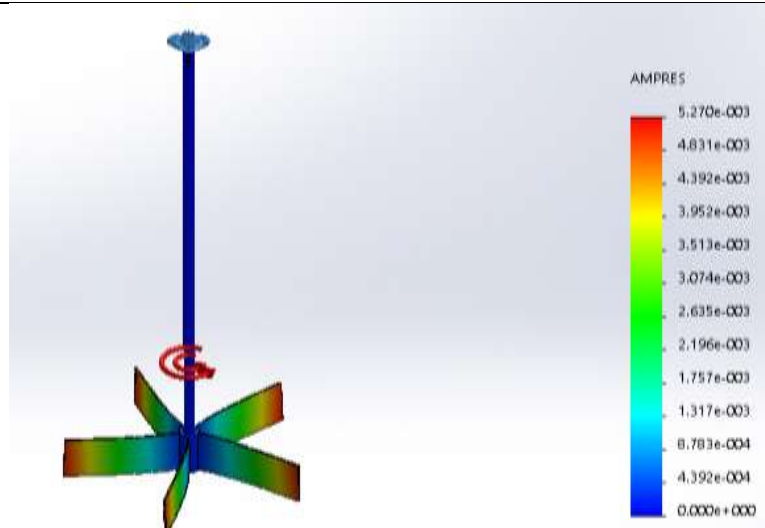


EQUIPO COMPLETOBIODIGESTOR. Analisis Estatico - Pandeo

Fuente: Elaboración propia/SOLIDWORKS-Simulation 2016

Tabla 14*Resultados de análisis de Pandeo para 600 rpm*

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Amplitud1	AMPRES: Amplitud resultante Plot para forma modal: 1 (Factor de carga = -0.672902)	0.000e+000 Nodo: 13705	5.270e-003 Nodo: 442

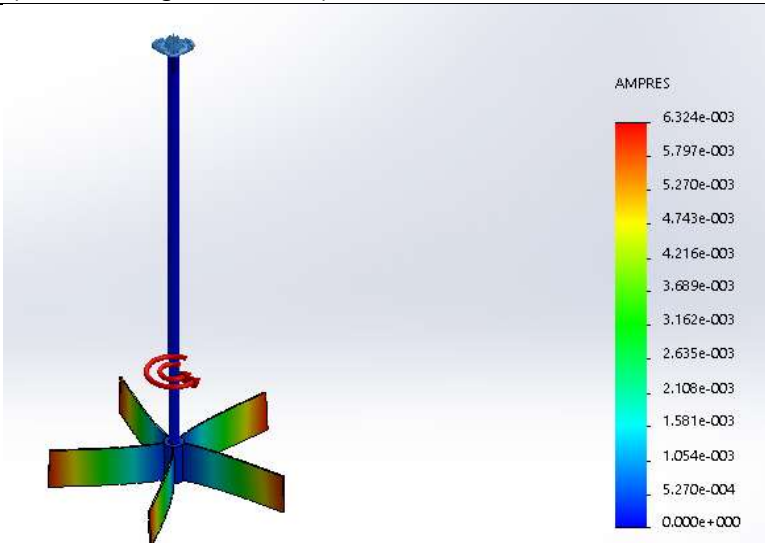


EQUIPO COMPLETOBIODIGESTOR. Analisis Estatico - Pandeo

Fuente: Elaboración propia/SOLIDWORKS-Simulation 2016

Tabla 15*Resultados de análisis de Pandeo para 500 rpm*

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Amplitud1	AMPRES: Amplitud resultante Plot para forma modal: 1 (Factor de carga = -0.968979)	0.000e+000 Nodo: 13705	6.324e-003 Nodo: 442



EQUIPO COMPLETOBIODIGESTOR. Analisis Estatico - Pandeo

Fuente: Elaboración propia/SOLIDWORKS-Simulation 2016

Tabla 16*Resultados de análisis de Pandeo para 500 rpm*

Régimen de Giro	Factor de carga
500	-0.96898
600	-0.67290
700	-0.49438
800	-0.37851

Fuente: Elaboración propia/SOLIDWORKS-Simulation 2016

El factor de carga de pandeo (BLF, por su sigla en inglés) es el factor de seguridad contra el pandeo o la relación de las cargas de pandeo con respecto a las cargas aplicadas. La siguiente tabla 17 muestra la interpretación de los valores BLF posibles:

Tabla 17*Interpretación de los valores BLF*

Valor BLF (factor de seguridad)	Estado del pandeo	Notas
$1 < \text{BLF}$	Pandeo no previsto	Las cargas aplicadas son menos que las cargas críticas calculadas. No se espera el pandeo.
$0 < \text{BLF} < 1$	Pandeo previsto	Las cargas aplicadas superan las cargas críticas calculadas. Se espera el pandeo.
$\text{BLF} = 1$	Pandeo previsto	Las cargas aplicadas son exactamente iguales a las cargas críticas calculadas. Se espera el pandeo.
$\text{BLF} = -1$	Pandeo no previsto	El pandeo se produce cuando se deshacen todas las direcciones de las cargas aplicadas. No se espera el pandeo.
$-1 < \text{BLF} < 0$	Pandeo no previsto	Se predice el pandeo si se invierten todas las cargas.
$\text{BLF} < -1$	Pandeo no previsto	No se predice el pandeo aun si se invierten todas las cargas.

Fuente: SOLIDWORKS-Simulation 2016

La simulación realizada es el análisis estático del sistema, la figura mostradas en las tablas 11 a 14 ilustra la distribución del Factor de carga o Seguridad (F.S.) de los alabes del agitador mecánico sometido a la carga dinámica máxima de 199.0124 kg, el F.S. mínimo se encuentra para un régimen de giro de 800 rpm, igual a - 0.37851 y el máximo se encuentra para un régimen de giro de 500 rpm, igual a - 0.96898.

Respecto a la escala de color el valor mínimo es 3.953e-003 para un régimen de giro de 800 rpm y el máximo es 6.324e-003 para un régimen de giro de 500 rpm ubicado en el nodo 442 de acuerdo al informe generado.

IV. Análisis y discusión:

Según el trabajo de *Castillo Uribe (2013)* el cual tuvo como finalidad diseñar un agitador de fluidos para una mezcla de agua y soda cáustica, obtuvo como resultados que la velocidad de diseño es de 115 rpm según los parámetros como el tipo de impulsor, la densidad y la viscosidad del fluido. En nuestro trabajo de investigación la mezcla utilizada fue de excremento de cuy, conejo y agua, cuya densidad es diferente a la usada por el autor, es por ello que nuestra velocidad de diseño corregida es 56 rpm, debido justamente a la diferencia de tipo de fluido usado. Sin embargo los parámetros usados son los mismos por el autor es el mismo usado por nosotros que corresponde a la densidad, viscosidad y tipo de impulsor. Además coincidimos con el autor que el agitador no debe girar en una zona de 300 a 450 rpm para evitar una posible falla de resonancia.

También de acuerdo a *Sánchez Rubai (2016)* quien ha simulado mediante CFD diferentes digestores a escala real (unos 2000 m³ de volumen) agitados con bombas de recirculación, cuya finalidad es establecer la influencia de la relación entre el diámetro y la altura, de la pendiente de la solera, del número de bombas y del caudal de recirculación en dichos digestores, obteniendo una relación diámetro/altura del digestor por encima de 1 empeora la agitación del mismo. Podemos indicar en nuestro caso que nuestro diseño cumple con el criterio de la relación E/DA (distancia del fondo del tanque hasta el rodete/diámetro del agitador) puesto que fue impuesto desde el inicio del diseño, con lo que se cumple de acuerdo a la simulación numérica.

Respecto a los otros parámetros como la pendiente en la solera del digestor y la esbeltez del tanque, no ha sido evaluado debido a que el biodigestor ya está construido, así que no fue posible conseguir la comparación, más para garantizar una agitación completa sin zonas muertas se implementó deflectores que cumplirán esa función.

Por su parte la investigación de *Quispe Candia (2017)* cuya finalidad fue analizar y determinar la mejor solución para un equipo de agitación que sirve para preparar la salmuera, el cual presentaba problemas de operatividad y eficiencia en mezcla y agitación, el autor llegó a la conclusión que para la

optimización del sistema de agitación debe trabajar con una turbina con cuatro palas inclinadas a 45° , así para el diseño del eje propulsor se calculó el momento flector y torsor, se determinó un diámetro comercial de eje de 25,4 mm. Aquí debemos hacer hincapié que los valores obtenidos para nuestro caso son muy similares rotor tipo turbina de 5 palas inclinado 45° y diámetro del eje 1 pulgada de diámetro comercial, debido a que son los típicos ejes para estos casos de agitación mecánica.

Finalmente es importante mencionar la investigación de *Taipe Castro (2019)* en su tesis tuvo como objetivo diseñar un biodigestor para mejorar la obtención de biogás y biol, luego de los cálculos respectivos determino que el volumen del biodigestor es de 1.04 m^3 y respecto al diseño del agitador que es del tipo vertical con 5 hélices, distribuidos a lo largo de un eje, este agitador debe girar lentamente y manualmente, y se debe dar de 4 a 6 vueltas diariamente. Al respecto podemos decir que nuestro diseño del biodigestor es de un volumen de 1.73 m^3 , casi el doble de capacidad, más aun así el agitador también es del tipo vertical con igual número de hélices. Respecto al giro en nuestro caso será con un motor eléctrico de $\frac{1}{4}$ de HP cuyo régimen e giro calculado es 56 rpm en un tiempo de mezclado de 5 minutos por día, que corresponde a 280 revoluciones o vueltas, el cual totalmente diferente al resultado del autor.

V. Conclusiones

En este trabajo de investigación se realizó el diseño de un agitador mecánico, el cual consiste en las características de eje y alabes del agitador así como los componentes generales y materiales requeridos, para el biodigestor semi continuo en la I.E.P.C. BERESHIT- Chimbote.

Se determinó los parámetros de operación del biodigestor que se encuentra instalado en la Institución Educativa Privada Cristiana Bereshi, los que agruparon en dos tipos; primero los parámetros geométricos como son el radio base en 0.8 m, alturas de campana 0.4 m, de la pared 1.0 m y del cono de base 0.24 m, los que permitieron determinar los volúmenes de la campana 0.54 m^3 , del biodigestor 1.57 m^3 y de la base 0.16 m^3 . Segundo los parámetros característicos de la materia prima como son las cantidades de materia prima requerida como fue de 4.2 kg de estiércol de conejo y 5.6 kg de estiércol de cuy, para ello se requiere de agua 29.4 litros. Estos parámetros son necesarios e importantes para el diseño del agitador mecánico.

Se realizó el diseño y selección del agitador mecánico, el cual siguiendo la metodología del trabajo de Penny (1970) el agitador es del tipo turbina de aspas inclinadas 45° , estos generan un patrón de flujo mixto y ordenado, cuyo diámetro es 53.3 cm, ancho del alabe de 10.7 cm, ancho del deflector 13.3 cm y longitud del alabe 13.3 cm. Además este agitador debe girar entre 45 a 56 rpm consideraremos el valor mayor, es decir 56 rpm para garantizar la óptima homogenización de la mezcla para ello se requiere de un motor eléctrico de $\frac{1}{4}$ HP. También se determinó un eje de acero, cuya medida comercial es de 1 pulgada de diámetro AISI 1018, especiales para transmisión mecánica. Finalmente se evaluó la tasa de circulación interna o flujo interno en el tanque el cual es de $0.078 \text{ m}^3/\text{s}$ el cual es adecuado para los fines que se persigue con el agitador.

Se determinó los componentes del sistema de agitación mecánica del biodigestor como son la base del motor eléctrico, el motor eléctrico, el eje rotor y sus acoplamientos mecánicos, el eje de salida del motor usado como transmisión mecánica, base del conjunto reductor de velocidad, el conjunto reductor de velocidad de giro, piñón de ataque y piñón corona, eje del agitador mecánico,

alabes o paletas del agitador, perno y tuerca (acero inoxidable) para la base del motor y cuerpo de concreto armado del biodigestor. Así como los materiales AISI 1020, 1045, 4130, 4140 y 4340.

Se realizó la simulación numérica del agitador mecánico del biodigestor, para ello se empleó el análisis estático en el los alabes que se encuentran sujetos al eje del agitador mecánico, con la finalidad de observar en comportamiento el pandeo en los alabes cuando se le aplica una carga centrífuga rotacional. Para el diseño y simulación se empleó el software SOLIDWORKS 2016. Cuyos valores obtenidos fueron para el Factor de Seguridad, F.S. mínimo se encuentra para un régimen de giro de 800 rpm, igual a -0.37851 y el máximo se encuentra para un régimen de giro de 500 rpm, igual a -0.96898 .

VI. Recomendaciones:

Se recomienda modernizar otros sistemas de agitación con otro software más potente como ANSYS que tiene una interface más completa, pudiéndose observar más parámetros por medio de ecuaciones más complejas, como la ecuación de energía, manteniendo el resto de variables: modelo de turbulencia, modelo de viscosidad de la mezcla y geometría del biodigestor. Por ejemplo, se podrían simular la agitación y observar la formación de gas metano o la agitación con otros tipos de alabes. La comparación de los resultados obtenidos en la nueva investigación con los resultantes del presente estudio nos permitiría evaluar qué sistema de agitación funciona mejor para la geometría de cada digestor en cuestión. O incluso, si un sistema de agitación es claramente mejor que otro. En este caso, también se podrían estudiar nuevas geometrías para los digestores.

Es importante que todo equipo térmico deba tener instalados instrumentos de medición y control, como manómetros para controlar la variación de la presión del biogás así como termómetros para controlar la temperatura interna de la mezcla.

Se recomienda a la institución educativa que, si no es posible adicionar placas deflectoras al cuerpo del biodigestor, pueden colocar el agitador con el eje impulsor excéntrico en el recipiente de agitación, para que los flujos generados por la agitación no sean circulares en el recipiente.

VII. Dedicatoria

A MI PADRES:

*Por su apoyo, por su motivación,
entusiasmo para tener la confianza
absoluta para seguir y cumplir los
objetivos trazados en la vida.*

Vásquez Arana, Erick Segundo

VIII. Agradecimiento

A la Universidad San Pedro

Por ser una casa de estudios superior donde durante el tiempo de nuestra permanencia logramos adquirir los conocimientos esenciales para desempeñar nuestra carrera y formación profesional necesaria para ser de éxito.

A nuestro Asesor de Tesis

Gracias a su paciencia, colaboración y aportes necesarios hemos podido realizar este proyecto, del mismo modo a los profesores de la escuela profesional de Ing. Mecánica Eléctrica de la USP quienes nos brindaron las enseñanzas requeridas que sirvieron de base para la elaboración del presente proyecto.

A Nuestros Compañeros y Amigos

Con su ayuda oportuna permitieron el desarrollo de este proyecto.

IX. Referencias Bibliográficas

- Angenent, L. T., 2008. *Effect of shear on performance and microbial ecology of continuously stirred anaerobic digesters treating animal manure*. Biotechnol Bioeng 100, 38–48.
- Bridgeman, J., 2012. *Computational fluid dynamics modelling of sewage sludge mixing in an anaerobic digester*. Advances in Engineering Software 44, 54–62.
- Castillo Uribe, V. (2013). *Diseño y cálculo de un agitador de fluidos*. (Tesis de grado). Universidad de Bío-Bío. Bío-Bío, Chile.
- Chen, J., Li, X., Liu, Y., Zhu, B., Yuan, H., Pang, Y., 2011. *Effect of mixing rates on anaerobic digestion performance of rice straw*. Nongye Gongcheng Xuebao/Trans Chin Soc Agric Eng 27, 144–148 (In Chinese).
- Fuenzalida A. (1995). *Estudio de la pre-factibilidad técnico económica para la instalación de una planta generadora de biogás a partir de la utilización de desechos orgánicos*. (Tesis de grado). Universidad Central de Chile. Santiago, Chile.
- Hoffmann, R. A., Garcia, M. L., Veskivar, M., Karim, K., Al-Dahhan, M. H., Karim, K., Klasson, K.T., Hoffmann, R., Drescher, S.R., DePaoli, D.W., Al-Dahhan, M.H. 2005c. *Anaerobic digestion of animal waste: effect of mixing*. Bioresource Technology 96, 1607–1612.
- Lee, S.R., Cho, N.K., Maeng, W.J., 1995. *Using the pressure of biogas created during anaerobic digestion as the source of mixing power*. J. Ferment. Bioeng. 80 (4), 415–417.
- Liao, X. and Li, H., 2015. *Biogas production from low-organic-content sludge using a high-solids anaerobic digester with improved agitation*. Applied Energy 148, 252–259.
- Ong, H.K., Greenfield, P.F., Pullammanappallil, P.C., 2002. *Effect of mixing on biomethanation of cattle-manure slurry*. Environ. Technol. 23, 1081-1090.
- Quispe Candia, L. B. (2017). *Optimización técnica del sistema mecánico de agitación de la salmuera en el procesamiento de la aceituna*. (Tesis de grado). Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Tacna, Perú.
- Raxón Díaz, E. H. (2013). *Diseño de un sistema de mezclado para la producción de suavizantes en la industria textil*. (Tesis de grado). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
- Sánchez Rubal, J. (2016). *Optimización de la agitación de un digestor anaerobio mediante mecánica de fluidos computacional*. (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.

- Stroot, P.G., McMahon, K.D., Mackie, R.I., Raskin, L., 2001. *Anaerobic codigestion of municipal solid waste and biosolids under various mixing conditions-I. digester performance*. Water Res. 35, 1804-1816.
- Taípe Castro, J. A. (2019). *Diseño de un biodigestor para mejorar la obtención de biogás y biol*. (Tesis de grado). Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo, Perú.
- Téllez Santana, C. A. (2008). *Diseño y selección de elementos para una planta de biogás*. (Tesis de grado). Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile.
- Torres Brito S. y Vaca Obando, N. (2010). *Diseño, construcción e instalación de un tanque marmita de 2800 lt y rediseño de la lavadora de botellas n°1 de la empresa Licoram*. (Tesis de grado). Escuela Politécnica del Ejército. Latacunga, Ecuador.
- Van Hulle, S. W. H., Vesvikar, M., Poutiainen, H., Nopens, I., 2014. *Importance of scale and hydrodynamics for modeling anaerobic digester performance*. Chemical Engineering Journal 255, 71–77.
- Vavilin, V. A., Angelidaki, I., 2005. *Anaerobic degradation of solid material: importance of initiation centers for methanogenesis, mixing intensity, and 2D distributed model*. Biotechnol Bioeng 89, 113-122.
- Vega Arquíno, J. A. (2015). *Diseño, construcción y evaluación de un biodigestor semicontinuo para la generación de biogás con la fermentación anaeróbica del estiércol de cuy y de conejo para la I.E.P.C Bereshi*. (Tesis de grado). Universidad Nacional del Santa. Ancash, Perú.

Lincografía

- Mezcladores y agitadores para biodigestores*. Revisado el 20 de julio del 2019. Disponible en: <https://www.aqualimpia.com/biodigestores-agitadores/>
- Guía de Referencia Técnica: *Agitadores mecánicos*. Revisado el 12 de agosto del 2019. Disponible en: http://industria.com/docs/Catalogo_Flow_Control_Agitadores_Industriales.pdf
- Lujan Ruiz, C. (2009). *Agitación*. Revisado el 08 de junio del 2019. Disponible en: <https://www.slideshare.net/guest6d731e/agitacion-1735401>.