



**DISEÑO DE UN BIOREACTOR PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A
PARTIR DE DESECHOS ORGÁNICOS A ESCALA DE LABORATORIO**

AUTORES:

ALEJANDRO JOSE PATRON NOCHES

ALFONSO ANDRES RODRIGUEZ BERMEJO

Proyecto de grado para optar por el título de ingeniero mecánico

ASESOR DISCIPLINAR:

ING. HENRY SANTAMARIA

COASESORA DISCIPLINAR:

DRA. DIANA OSSA

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA

UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL CARIBE

BARRANQUILLA, MARZO DE 2014



**DISEÑO DE UN BIOREACTOR PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A
PARTIR DE DESECHOS ORGÁNICOS A ESCALA DE LABORATORIO**

AUTORES:

ALEJANDRO JOSE PATRON NOCHES

ALFONSO ANDRES RODRIGUEZ BERMEJO

ASESOR DISCIPLINAR:

ING. HENRY SANTAMARIA

COASESORA DISCIPLINAR:

DRA. DIANA OSSA

ASESOR METODOLOGICO:

ING. RICARDO MENDOZA QUIROGA

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA

UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL CARIBE

BARRANQUILLA, MARZO DE 2014



CONTENIDO

1.	FORMULACION DEL PROBLEMA	6
2.	JUSTIFICACIÓN	8
3.	OBJETIVOS	9
3.1	Objetivo general:	9
3.2	Objetivos específicos:.....	9
4.	MARCOS DE REFERENCIA.....	10
4.1	Antecedentes	10
4.2	Marco teórico	19
4.4	Marco conceptual	34
5	DISEÑO METODOLOGICO	36
6.	RESULTADOS	39
7.	PRESUPUESTO	60
8.	CRONOGRAMA PARA LA EJECUCION DE LA METODOLOGIA.....	61
9.	CONCLUSIONES.....	62



TABLA DE SIMBOLOS

D_a	=	Diámetro que forman las aspas
N	=	Revoluciones por minuto (rpm) o revoluciones por segundo (rps)
μ	=	Viscosidad de la biomasa
P	=	Densidad de la biomasa
g	=	Gravedad
N_p	=	Número de potencia
P	=	Potencia requerida
lb	=	Libra
ft	=	Pie
r	=	Radian
s	=	Segundo
W	=	Watts
N_{Re}	=	Número de Reynolds



INTRODUCCIÓN

El etanol es un combustible que puede producirse a partir de un gran número de substratos vegetales, sin embargo, dependiendo del substrato utilizado existe una variación del rendimiento entre el combustible consumido y el generado en dicho proceso. Este etanol, conocido como bioetanol, está sujeto a una fuerte polémica: para unos se perfila como un recurso energético potencialmente sostenible que puede ofrecer ventajas medioambientales y económicas a largo plazo en contraposición a los combustibles fósiles, mientras que para otros es el responsable de grandes deforestaciones y del aumento del precio de los alimentos, al suplantarse selvas y terrenos agrícolas para su producción, dudando además de su rentabilidad energética.

Una de las alternativas planteadas para la solución de dicha problemática, es la producción de bioetanol de segunda generación, en la cual la materia prima utilizada proviene de diversos residuos agrícolas. Hoy en día es una de las temáticas investigadas por muchas empresas del ámbito ambiental y productoras de combustible.

La fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (en adelante, FORSU) – que contiene papel, vegetales, alimentos y madera-, y sus derivados compostados, se catalogan por su composición como material lignocelulósico. La FORSU posee polisacáridos de origen celulósico y hemicelulósico, y una considerable proporción de ligninas. Este material de desecho, generalmente finaliza acumulándose en vertederos. Las plantas gestoras de residuos sólidos urbanos, RSUs, llevan tiempo buscando una salida a este residuo para evitar su almacenamiento, que alcanza volúmenes de miles de toneladas. Hasta el momento, no se ha encontrado ninguna solución económicamente rentable¹.

¹Sánchez Cano Julieta Evangelina - Producción de etanol a partir de basura orgánica, el programa PERSEO aplicado a México – 2010.



El bioetanol tiene las mismas características y composición química que el etanol ya que se trata del mismo compuesto. La diferencia radica en su proceso de producción y la metodología de diseño. El diseño en bioingeniería no es solo la aplicación de conceptos básicos y teóricos que conlleven a lograr un prototipo; para la realización integral de un modelo, se requiere de la adaptación creativa y de la utilización del ingenio propio para lograr el objetivo de relacionar el ambiente biológico de un cultivo vivo con el ambiente artificial de un dispositivo controlado, dando como resultado el denominado bioreactor o reactor biológico. Un bioreactor es por tanto un dispositivo biotecnológico que debe proveer internamente un ambiente controlado que garantice y maximice la producción y el crecimiento de un cultivo vivo; esa es la parte biológica. Externamente el bioreactor es la frontera que protege ese cultivo del ambiente externo: contaminado y no contaminado. El bioreactor debe por tanto suministrar los controles necesarios para que la operación se lleve a cabo con economía, alto rendimiento (productividad) y en el menor tiempo posible; esa es la parte tecnológica².

Este proyecto presenta una mejora desde el punto de vista del diseño, ya que este bioreactor mejoraría el proceso de producción de bioetanol gracias al sistema de agitación y monitoreo además habría un ahorro económico ya que su costo sería más asequible comparado con los bioreactores que se encuentran en el mercado.

² Ibañez Diana. Morales Haddy. Diseño y simulación de un fermentador aerobio para producir etanol a partir de jarabe de glucosa usando levaduras nativas.(2011)



1. FORMULACION DEL PROBLEMA

En la actualidad el mejoramiento tecnológico ha permitido gozar de comodidades y privilegios que antes eran inimaginables, viajes espaciales, edificios inteligentes, medios de transportes más rápidos y cómodos, plantas industriales más grandes, etc. Pero para que esta tecnología funcione requiere de una fuente energética. En los últimos años las fuentes no renovables o combustibles fósiles han liderado en cuanto a la demanda energética, sin embargo en vista de que la producción de estos combustibles fósiles está disminuyendo y que contribuye fuertemente al calentamiento global, la tendencia mundial es a la producción de energías renovables³. Las industrias conformadas por las grandes empresas están enfocadas al mejoramiento continuo y a optimizar sus procesos con el máximo aprovechamiento de los recursos. Pero otro aspecto importante que está siendo considerado por estas grandes empresas, como Coca Cola, Apple, entre otras, es el del medio ambiente. ¿Cómo se podría disminuir el impacto al medio ambiente?. Esto sin duda se logrará con un compromiso total de parte de las industrias poniendo al medio ambiente por delante de muchos de sus intereses y priorizando así al ecosistema.

De otro lado, en el mundo uno de los grandes problemas es el de las basuras, pero ¿Cuales serian los procesos óptimos para procesar la basura orgánica?. La investigación en este ámbito se ha extendido a varios campos siendo uno de los más prometedores el de la generación de bioetanol de primera y segunda generación, enfocándose en la actualidad en este último ya que no compete en el campo alimenticio; sin embargo ¿Que tan óptimo es el bioetanol extraído a partir de desechos orgánicos? Este bioetanol denominado de segunda generación está en pleno desarrollo para perfilarse como un recurso energético potencialmente sostenible que puede ofrecer ventajas medioambientales y económicas a largo plazo en contraposición a los

³ PICHAS MADRUGA Ramón - Tendencias energéticas mundiales - 2011



combustibles fósiles; este compuesto ya se usa para ser mezclado con la gasolina en vehículos de combustible flexible o “vehículos Flex”⁴.

El proceso de generación del bioetanol no solo nos beneficia en el aspecto energético sino que también nos ayuda a solucionar el problema de los desechos orgánicos, pero ¿Qué beneficios sociales puede traer el tratamiento de la basura para hacer bioetanol?. Ya que la basura se plantea como un gran problema social a solucionar, a través de la obtención de bioetanol se logra disminuir el impacto de las basuras al medio ambiente, convirtiendo este proceso en un proceso “win-win” o gana-gana, ya que se disminuye el impacto ambiental causado por las basuras y por los combustibles fósiles y a la vez se obtiene un combustible alternativo y verde. El proceso de producción de bioetanol de segunda generación está en desarrollo, siendo que en países donde lidera España, Estados Unidos, Canadá y Brasil se tiene un alto nivel de investigación en este área. En este sentido cabe resaltar los programas PERSEO y ATENEA de España, los cuales están siendo replicados en otros países como México, Brasil, entre otros.⁵ La importancia de los equipos donde se realiza un bioproceso, como lo es el bioreactor, es muy alta ya que estos definirán la eficiencia del proceso. Un bioreactor se puede definir como un sistema que proporciona un medio ambiente controlado permitiendo el crecimiento eficaz de las células y la formación de un producto, en el cual deben tener niveles óptimos de temperatura, pH, substrato, sales, oxígeno u otros gases, para así convertir la materia prima en productos específicos de interés. El siguiente proyecto tiene como fin el diseño de un reactor en el que se produzca etanol a partir de materia orgánica. De la formulación de este proyecto se derivan las siguientes preguntas: ¿Cómo se mejora la eficiencia del proceso al mejorar las condiciones del bioreactor? A través de la implementación de este proyecto se busca dar inicio a una fase preliminar de laboratorio de una manera más viable gracias a la fácil construcción sin perder la eficiencia en el proceso para luego pasar a la producción de mayor escala.

⁴ Ibid. Pag. 3.

⁵ Op. Cit. Pag. 3.



2. JUSTIFICACIÓN

La importancia de este proyecto radica en mejorar el proceso de producción de bioetanol a un bajo costo, se aumenta la viabilidad de la producción de bioetanol de segunda generación a gran escala. Siendo este un proyecto que plantea la base (diseño idóneo de bioreactor para la producción de bioetanol) para disminuir el impacto de las basuras en la ciudad y a la vez obtener un combustible alternativo amigable con el medio ambiente hace que sea interesante su investigación y viabilidad.

Basándose en los grandes volúmenes de generación de basura en Barranquilla, se puede observar una potencial fuente de desechos orgánicos para ser utilizados en la obtención de bioetanol y puede ser una solución eficiente para disminuir el daño al ambiente. El diseño de los bioreactores es una tarea de ingeniería que requiere muchos conocimientos técnicos específicos del proceso a realizar. Los microorganismos o células son capaces de realizar su función deseada con gran eficiencia bajo condiciones óptimas. Las condiciones ambientales de un bioreactor tales como flujo de gases (por ejemplo, oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono, etc.), temperatura, pH y velocidad de agitación o circulación, deben ser cuidadosamente monitoreadas y controladas. La mayoría de los fabricantes industriales de bioreactores usan recipientes, sensores, controladores y un sistema de control interconectados para su funcionamiento en el sistema de bioreacción. Uno de los aspectos que se debe tener en cuenta en un bioproceso, es la propagación celular que conlleva a formaciones de capas de microorganismos indeseables (fenómeno conocido en inglés como *Fouling*) que puede afectar la esterilidad y eficiencia del bioreactor, especialmente cuando se acumulan en partes críticas del reactor como los intercambiadores de calor, gases y orificios de salidas y entradas. Por estas razones, entre otras, el diseño de un reactor es la base para asegurar la eficiencia en el funcionamiento de un bioproceso.⁶

⁶ http://www.science.oas.org/Simbio/mbio_ind/cap3_mi.pdf



3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general:

- Diseñar un reactor anaeróbico, de capacidad de 10 litros, para la producción de bioetanol a partir de desechos orgánicos, con el fin de contribuir en la futura eficiencia del proceso.

3.2 Objetivos específicos:

- Seleccionar los parámetros necesarios para el diseño óptimo del reactor, tales como materiales, aspas, sellado hermético, forma geométrica entre otros.
- Diseñar un sistema de agitación apropiado para el reactor bioquímico que ayude en la eficiencia del proceso.
- Realizar planos detallados del reactor bioquímico, con los respectivos cálculos mecánicos mediante software CAD.



4. MARCOS DE REFERENCIA

El desarrollo de la producción de bioetanol vino impulsada por la llamada primera crisis del petróleo desde mediados de los años setenta del siglo pasado. El primer país que asumió el reto fue Brasil produciendo el biocombustible a partir de caña de azúcar, y posteriormente se le unió Estados Unidos, fabricándolo a partir del maíz.

A partir de mediados de los 80, a esta motivación se le unieron las políticas de mejoras medioambientales, principalmente en lo relativo a emisiones gaseosas. El creciente interés que han generado en los últimos años los problemas derivados del cambio climático, producido por las emisiones de gases de “efecto invernadero”, ha hecho que se busquen combustibles más respetuosos con el medio ambiente.⁷

En años recientes ha existido un gran interés en los procesos de fermentación en medio sólido por los altos rendimientos que se han obtenido en la producción de metabolitos de alto valor agregado de interés industrial, por lo que se han llevado a cabo investigaciones en el diseño de biorreactores en busca de que sean aplicados a nivel industrial. En el presente trabajo se llevó a cabo una revisión de los principales equipos diseñados para bioprocesos en medio sólido.

4.1 Antecedentes

En el mundo entero se está apostando por la producción de energías renovables en vista de que la producción de petróleo está disminuyendo, que es un producto que tiende a desaparecer en el mediano plazo y que contribuye fuertemente al calentamiento global. Entre los países que han resaltado en este

⁷ http://www.imecal.com/perseo/bio_desarrollo.html - 2012.



tema está España, que es un país que ha puesto en marcha proyectos de energía renovable de suma importancia a nivel mundial como por ejemplo la producción de etanol a partir de basura orgánica, siendo la basura orgánica un insumo siempre disponible y de bajo costo que no compite con la producción de alimentos ni causa daños al medio ambiente.

Muchos países están en el camino de la producción de bioetanol a escala industrial ya que sus beneficios son innumerables. Se dice que la combustión del bioetanol produce el mismo CO₂ que absorbió la planta durante su crecimiento, si se exceptúa el emitido debido a la actividad energética necesaria en el proceso de su producción, por lo que algunos autores dicen que el balance es cero, en cuanto a las emisiones de CO₂.

Debido a estas razones, a partir del año 2001 se presentó un crecimiento de la producción de bioetanol siendo el biocombustible líquido de mayor consumo en el mundo y con una diferencia cada vez mayor al biodiesel, que ha seguido aumentando en los últimos años debido tanto a las políticas de mejoras medioambientales adoptadas por gran parte de los países del mundo, como a la inestabilidad de los precios del petróleo.⁸

México es uno de los países más poblados del planeta y es, en consecuencia, de los que genera más residuos orgánicos que podrían utilizarse para la producción de biocombustibles de 2^a generación; es importante que dichos insumos para biocombustibles sean ecológicamente sostenibles y rentables, para evitar de esta manera que se siga afectando el medioambiente y para disminuir la fuerte dependencia del sector petrolífero. Es de vital importancia tener una alternativa a los combustibles de origen fósil, que son finitos y además, su producción ha disminuido considerablemente como ya lo ha expuesto la petrolera mexicana (PEMEX)⁹. Esta gran empresa se interesó en la investigación de esta alternativa energética ya que sus producciones de

⁸ Ibid. Pag. 8.

⁹ Ibid. Pag. 8.



combustibles fósiles han tendido a la baja ya sea por la escasez de la materia prima o su difícil extracción de las fuentes.

Debido a la tendencia mundial de buscar fuentes de energías renovables y no contaminantes, la empresa IMECAL S.A., junto con las empresas CIEMAT y FORD deciden incursionar en opciones alternativas de combustibles. En el año 2003 en l`Alcudia (valencia) nace el PROYECTO PERSEO, que consiste en generar bioetanol a partir de residuos orgánicos de la basura; a las empresas les pareció atractivo que la materia prima es de coste cero debido a que supone la retirada de un material de elevado impacto medio ambiental.

Después de un arduo trabajo por parte de científicos en diferentes áreas (biología, microbiología, química, ingeniería, entre otros) se finaliza la fase de laboratorio con resultados positivos obteniendo un proceso capaz de transformar los residuos orgánicos en la basura a bioetanol. En el año 2006 se construyó la planta piloto de demostración a nivel semi-industrial del proceso en las instalaciones de IMECAL S.A., con una capacidad para procesar 70 toneladas de residuos orgánicos por día.

La planta de demostración PERSEO tiene una capacidad de procesado en fermentación de hasta 70 tm/d de fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (correspondiente a unas 140 toneladas de residuos sólidos urbanos), tratándose de una de las mayores plantas pilotos experimentales a nivel mundial¹⁰. La planta tiene la función de validar y demostrar el proceso de producción de bioetanol y su rentabilidad a escala semi-industrial, impulsando el desarrollo de un proceso de obtención de bioetanol tanto técnica, como económicamente viable y competitivo.¹¹

La fermentación en medio sólido es una tecnología que tuvo sus orígenes como un arte ancestral. Originalmente, estos procesos fueron aquellos en los que hongos filamentosos invadían ciertos materiales sólidos que luego eran consumidos por las personas, por ejemplo el Koji y el Tempeh que son

¹⁰ http://www.imecal.com/perseo/perseo_planta.html (2011)

¹¹ Ibid. Pag. 9.



alimentos tradicionales asiáticos, los quesos camembert y roquefort en Europa (Viniegra-González, 1995). La característica esencial de la fermentación sólida es el crecimiento del microorganismo sobre un sustrato insoluble sin una fase libre, variando el nivel de humedad del 30 a 80% (Laukevics et al., 1984).¹²

La función básica del reactor es la de realizar prácticas de laboratorio de diseño de reactores químicos donde se determinan constantes de equilibrio, constantes de velocidad de reacción, así como el orden de reacción, en reacciones tales como, esterificaciones, hidrólisis ácida, alcalina y dextracarboxilaciones. Todos los componentes del reactor serán construidos en lámina de acero 304 cédula 40, cuyo material sea capaz de soportar álcalis (NaOH, KOH, NH₄OH), temperaturas hasta de 90 °C y un pH de 10, ácidos minerales (HCl, HNO₃, H₂SO₄) hasta un 15% en peso y temperaturas de 80-90 °C, así como compuestos orgánicos como: ácido acético, ácido benzoico, alcoholes metílico, etílico, propílico, butílico, formaldehído, tetracloruro de carbono, furfural, glicerina, éter de petróleo, nafta (1). Además el equipo contará con un mecanismo de agitación (agitador de paletas), accionado por medio de un motor reductor de velocidad.¹³

Se diseña un bioreactor de una botella de refresco para realizar investigaciones sobre el compost. El proyecto es bastante pequeño y barato para que alumnos puedan crear y realizar proyectos de investigación, comparando variables en diseño, contenido de humedad y distintas mezclas de materiales. Debería utilizar el diseño descrito aquí para sólo empezar, luego se puede improvisar y permitir que los estudiantes creen sus propias ideas para construir y diseñar los biorreactores.¹⁴

¹² Aguilar, C.N., Augur, C., Favela-Torres, E., Viniegra-González, G. (2001) Induction and repression patterns of fungal tannase in solid-state and submerged cultures. *Process Biochemistry*

¹³ Rivera Hernández Rosario, Vega Navarro Eleazar. Diseño de un reactor químico intermitente de acero 304 de 6 litros de capacidad. *Conciencia Tecnológica*, núm. 24, 2004. Instituto Tecnológico de Aguascalientes. México

¹⁴ Egmasa. consejería del medio ambiente. construcción de un bioreactor a partir de una botella de refresco



Algunos trabajos anteriores a este:

- Diseño integral de biorreactores continuos de tanque agitado aplicados a procesos de fermentación-universidad nacional de colombia sede manizales facultad de ingeniería doctorado en ingeniería automática manizales 2010¹⁵.

En este trabajo, se formula una estrategia integral de diseño de biorreactores con el objeto de obtener procesos más eficientes desde un punto de vista técnico, energético y ambiental. La estrategia incluye una modificación del método convencional de diseño de biorreactores continuos de tanque agitado, en el cual las condiciones de operación se determinan con base en el análisis de estabilidad del biosistema.

- H. A. Ruíz-Leza, R. M. Rodríguez-Jasso, R. Rodríguez-Herrera, J. C. Contreras-Esquivel, C. N. Aguilar Diseño de biorreactores para fermentación en medio sólido Revista Mexicana de Ingeniería Química, vol. 6, núm. 1, 2007, pp. 33-40, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa México.¹⁶

En años recientes ha existido un gran interés en los procesos de fermentación en medio sólido por los altos rendimientos que se han obtenido en la producción de metabolitos de alto valor agregado de interés industrial, por lo que se han llevado a cabo investigaciones en el diseño de biorreactores en busca de que sean aplicados a nivel industrial. En el presente trabajo se llevó a cabo una revisión de los principales equipos diseñados para los bioprocesos en cultivo sólido.

¹⁵ <http://www.bdigital.unal.edu.co/2356/1/isabelcristinapazastudillo.2009.pdf>

¹⁶ <http://www.redalyc.org/pdf/620/62060105.pdf>



- Diseño de un biorreactor anaeróbico para el tratamiento de aguas residuales en la producción de agua potable.¹⁷

En el diseño del biorreactor se tuvo en cuenta, además del tipo de proceso microbiológico, el efecto del flujo, el tiempo de residencia, el pH, la temperatura, la biomasa, la concentración de nutrientes y la velocidad de agitación para que se desarrolle en forma óptima la conversión de los lodos arsenicados, provenientes del proceso de potabilización del agua que se realiza en las plantas localizadas en Antofagasta y Calama (Chile). El reactor corresponde a la clasificación de reactores de contacto anaerobio, el cual presenta numerosas ventajas.

- Control de un biorreactor para fermentación alcohólica. EN CONTINUO - N. Echeverry, O. Quintero, M. Ramírez y H. Álvarez, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín Facultad de Minas carrera 80 barrio Robledo. - Medellín –COLOMBIA Grupo de Automática de la Universidad Nacional (GAUNAL), Instituto de Automática y Procesos Industriales (IAPI).¹⁸

En este trabajo se plantean algunas soluciones para el control de las variables biotecnológicas del proceso usando el algoritmo tradicional PID, haciendo un análisis dinámico de los resultados y planteando estructuras multilazo y multivariable usando desacopladores entre algunas variables para la optimización del proceso.

- Aguilar, C.N., Augur, C., Favela-Torres, E., Viniegra-González, G. (2001) Induction and repression patterns of fungal tannase in solid-state and submerged cultures. *Process Biochemistry*.

Se establecieron de inducción y represión patrones de producción tanasa por *Aspergillus niger* Aa-20 en estado sólido (SSC) y el cultivo

¹⁷ <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/i-142.pdf>

¹⁸ http://www.inaut.unsj.edu.ar/Files/1699_04.pdf



sumergido (SMC). El ácido tánico y la glucosa se utilizaron como fuentes de carbono. Relaciones de inducción y la represión se obtuvieron con diferentes concentraciones de ácido tánico y glucosa, respectivamente. Los resultados presentados demuestran la capacidad de SSC para reducir al mínimo la represión catabólica. También se estudió el papel del ácido gálico en la regulación tanasa.

- Rivera Hernández Rosario, Vega Navarro Eleazar. Diseño de un reactor químico intermitente de acero 304 de 6 litros de capacidad. Conciencia Tecnológica, núm. 24, 2004. Instituto Tecnológico de Aguascalientes. México.

La mayoría de los centros de educación superior del país donde se estudia la carrera de Ingeniería Química, cuentan para el laboratorio de reactores químicos con equipo de 60-120 lts. de capacidad para realizar estudios cinéticos, provocando por tanto un alto costo en la ejecución de las prácticas. Se puede decir que más del 90% de estos equipos son de procedencia extranjera. Tales equipos extranjeros presentan en ocasiones malos diseños, así como altos costos de instalación como de mantenimiento. El presente estudio trata de subsanar de alguna manera la problemática mencionada, proponiendo para ellos el diseño de un reactor químico intermitente de acero 304 con capacidad de 6 lts.

- Isabel Cristina Paz Astudillo, Carlos Ariel Cardona Alzate. Influencia de las regiones de estabilidad del biorreactor en la producción eficiente de alcohol carburante.

En este trabajo se muestra la influencia de las regiones de estabilidad sobre la eficiencia del proceso tomando como criterios de evaluación índices de impacto económico y ambiental. Para esto, se realizó un análisis de estabilidad donde se tomó como parámetro de operación principal la velocidad de dilución.



- Seteno Ntwampe; Faysol Chowdhury; Marshall Sheldon; Heinrich Volschenk. Resumen de los parámetros que influyen en la biomasa y el rendimiento biorreactor utilizado para la producción ligninasa extracelular de *Phanerochaete chrysosporium*.

En esta revisión, el rendimiento de biomasa *P. chrysosporium*, evaluada en términos de producción ligninasa utilizando diferentes condiciones de operación del biorreactor, se resalta. Además, se discuten las limitaciones relacionadas con la aplicación de las condiciones de cultivo por lotes optimizados para biorreactores de película fija continuas.

- Lina María Agudelo Escobar, Uriel Alvarez Salazar, Mariana Peñuela. Producción continua de etanol en lecho relleno-biorreactores con células de levadura inmovilizadas sobre residuos lignocelulósicos.

En este trabajo se evaluó la producción continua de etanol en los reactores de lecho empacado con células de levadura inmovilizadas sobre virutas de madera, bagazo de caña, la licencia de maíz y residuos lignocelulósicos de la mazorca de maíz. Se utilizó la glucosa como fuente de carbono para establecer las condiciones de referencia y hemos hecho las fermentaciones con sacarosa comercial.

- Walter Muñoz Cruz; Oscar Alejandro Vanegas Monterrosa; Andrés Alberto Guzmán Rosas; Jacqueline Capataz Tafur; Rodrigo Alberto Hoyos Sánchez y Fernando Orozco Sánchez. Estimación de variables de operación de un biorreactor con células de *Azadirachta indica* A. Juss.

Se estudiaron las variables de operación de un biorreactor de tanque agitado para el cultivo de células en suspensión de *Azadirachta indica* A. Juss.



Este proyecto presenta una mejora desde el punto de vista del diseño, ya que este bioreactor mejoraría el proceso de producción de bioetanol gracias al sistema de agitación y monitoreo además habría un ahorro económico ya que su costo sería más asequible comparado con los bioreactores que se encuentran en el mercado. A través de la implementación de este proyecto se busca dar inicio a una fase preliminar de laboratorio de una manera más viable gracias a la fácil construcción sin perder la eficiencia en el proceso para luego pasar a la producción de mayor escala. La importancia de este proyecto radica en mejorar el proceso de producción de bioetanol a un bajo costo, se aumenta la viabilidad de la producción de bioetanol de segunda generación a gran escala. Siendo este un proyecto que plantea la base (diseño idóneo de bioreactor para la producción de bioetanol) para disminuir el impacto de las basuras en la ciudad y a la vez obtener un combustible alternativo amigable con el medio ambiente hace que sea interesante su investigación y viabilidad.



4.2 Marco teórico

En años recientes ha existido un gran interés en los procesos de fermentación en medio sólido por los altos rendimientos que se han obtenido en la producción de metabolitos de alto valor agregado de interés industrial, por lo que se han llevado a cabo investigaciones en el diseño de biorreactores en busca de que sean aplicados a nivel industrial.

La Ingeniería de la Reacción Química o Ciencia de los Reactores, de acuerdo a la definición en el Congreso de Amsterdam de 1957, tiene por objeto el Diseño y control de reactores químicos para producciones industriales. Ello comprende el análisis de reactores, tanto el diseño como la operación de los mismos.

J. Villermaux (2000) define un reactor de la siguiente manera: “un reactor es cualquier porción del espacio donde la materia circula, se intercambia y se transforma”, más específicamente se puede considerar al reactor como una unidad donde tiene lugar las reacciones con un objetivo principal de producción industrial.

La fermentación en medio sólido ofrece una serie de ventajas económicas sobre los procesos convencionales de fermentación sumergida para la obtención de productos de alto valor agregado, como etanol, enzimas, antibióticos, hongos comestibles, ácidos orgánicos, aminoácidos, pigmentos, metabolitos secundarios, etc, debido a los bajos niveles de humedad y a la disminución del volumen del medio por unidad de peso de sustrato, además de que se obtiene una alta productividad, los volúmenes de fermentación son menores comparado con los sistemas sumergidos.

El diseño de bioreactores para la fermentación en medio sólido ha avanzado lentamente en la última década debido a problemas de operación, fenómenos de transporte y escalamiento, por lo que es un área de la biotecnología que se encuentra en un estado de intenso desarrollo.



La presente revisión tiene como objetivo presentar las características de los bioreactores diseñados para la fermentación en medio sólido a escala piloto y/o laboratorio.

4.2.1 Principios de diseño de un bioreactor. Los Bioreactores son los equipos donde se realiza el proceso de cultivo (también comúnmente denominado “fermentador”), sea en estado sólido o líquido. Su diseño debe ser tal que asegure homogeneidad entre los componentes del sistema y condiciones óptimas para el crecimiento microbiano y la obtención del producto deseado. Es importante tomar en cuenta los problemas de transferencia de calor y oxígeno o gases sobre la cama de sustrato, los cuales dependen de las características de la matriz que se esté utilizando para la fermentación, siendo éste, uno de los principales factores que afectan el diseño y las estrategias de control. Los criterios más importantes para el diseño de un bioreactor pueden resumirse del siguiente modo dependiendo del tipo de bioreactor y la fermentación a utilizar:

- El tanque debe diseñarse para que funcione asépticamente durante numerosos días, para evitar la aparición de contaminantes en las operaciones de bioprocesos de larga duración.
- Debe permitir una mayor área de contacto entre las fases biótica y abiótica del sistema, es decir, se debe proporcionar un sistema adecuado de aireación o de anaerobiosis y agitación para cubrir las necesidades metabólicas de los microorganismos.
- El consumo de energía debe de ser el mínimo posible.
- Entradas para la adición de nutrientes y el control de pH.
- El crecimiento microbiano es generalmente exotérmico, por lo cual el bioreactor debe facilitar la transferencia de calor del medio hacia las células y viceversa, a medida que se produce el crecimiento celular, además de mantener estable la temperatura deseada.



- Mantener las células uniformemente distribuidas en todo el volumen de cultivo.
- Suministrar oxígeno u otros gases a una velocidad tal que satisfaga el consumo.
- El diseño debe ser tal que permita mantener el cultivo puro; una vez que todo el sistema ha sido esterilizado y posteriormente inoculado con el microorganismo deseado.

Los bioreactores más utilizados a nivel industrial están provistos de mecanismos de agitación, dispersión y aireación así como de sistemas para el control de la temperatura y pH. Los bioreactores deben ser optimizados para obtener la máxima concentración de productos de la fermentación, como lo son los metabolitos en un tiempo mínimo y a menor costo de producción.

4.2.2 Bioreactores para Fermentación en Medio Sólido. La última década ha sido una de las más importantes para el desarrollo en el diseño, operación y escalamiento de bioreactores para la fermentación en medio sólido. Los tipos de bioreactores más estudiados han sido los de bandeja y los de tambor rotatorio y desde hace pocos años se han introducido un nuevo tipo de bioreactores en fermentación en medio sólido denominados de cama empacada o columna de lecho fijo.

Dentro de los procesos de fermentación en medio sólido existen actualmente dos categorías: a escala laboratorio en las cuales se utilizan pequeñas cantidades de medio sólido desde gramos hasta pocos kilogramos, y el otro que es a escala piloto y escala industrial en donde se utilizan desde kilogramos hasta toneladas (Tabla 1). En la primera categoría existen muchos diseños de bioreactores, los cuales llegan a ser muy sofisticados, mientras que en la



segunda categoría es poca la variedad de bioreactores utilizados, solo algunos de los bioreactores a nivel industrial pueden operar en condiciones estériles.¹⁹

Tabla 1. Clasificación y diferencias en birreactores a nivel laboratorio, piloto e industrial.

BIORREACTOR	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<i>Escala laboratorio</i>		
Columna	Económico, fácil montaje, monitoreo y control humedad, temperatura, biomasa y CO ₂ . Conexión en forma continua de varias columnas.	Canales preferenciales de O ₂ , dificultad en la toma de muestra y problemas en la eliminación de calor.
Columna Estéril	Control de humedad y temperatura. Sistema de esterilización previo inoculación y toma de muestra.	Formación de gradientes de concentración de O ₂ y nutrientes.
Tambor horizontal	Mayor aireación y mezclado del sustrato. Existen varios diseños con modificaciones que mejoran la remoción del calor.	Daño de estructura micelial. Dificultad en el control de temperatura y humedad. Poco volumen utilizado en el tambor
Zymotis	Mejor transferencia de calor	Problemas de asepsia en el proceso. Mayor compactación de la cama de sustrato
Growtek	Facilidad en la toma de muestra. Mayor contacto entre el medio de cultivo y el soporte sólido. Menor acumulación de calor en la cama de sustrato.	No cuenta con un sistema de aireación. Solo se pueden manejar una sola carga de 400 mL de medio líquido por fermentación.
Proceso continuo	Menor tiempo de residencia. Mejor mezclado y crecimiento fúngico. Mayor asepsia.	Transferencia no homogénea de calor. Aglomeración de células por rompimiento micelial
Columna-Charola	Económico. Alta transferencia de O ₂ y aireación. Mayor transferencia de nutrientes. Fácil remoción de temperaturas elevadas.	Primer Prototipo. Optimizar la cantidad y tamaño de charolas en el volumen del cilindro.
<i>Escala piloto y/o industrial</i>		
Biocon	Automatizado en el control de las variables de estudio del crecimiento microbiano. Altos niveles de asepsia. Equipo compacto.	Dificultad en la toma de muestra. Rápida generación de calor exotérmico por crecimiento microbiano.
Lecho fluidizado	Operación de forma continua. Menor aglomeración del sustrato. Incremento en la transferencia de O ₂ y humedad. Variedad de configuraciones de soportes.	Formación de altos esfuerzos cortantes que pueden afectar al microorganismos y rendimiento del producto

Tabla 1. Durand, A. (2003). Bioreactor design for solid fermentation. Biochemical Engineering Journal 13,113-125.

4.2.3 Bioreactor en columna. Uno de los más interesantes sistemas para fermentación en medio sólido a nivel laboratorio fue el desarrollado y patentado por el grupo del Instituto para la Investigación y Desarrollo (IRD) en Francia,

¹⁹. Laukevics, J. J., Aspite, A. F., Viesturs, H. E., Tengerdy, R. P. (1984). Biotechnology and Bioengineering 26, 2465-2474.



entre 1975 y 1980, compuesto por pequeñas columnas de cuatro centímetros de diámetro y veinte centímetros de altura, el cual es llenado con un medio previamente inoculado y puesto en un termostato de agua (Fig. 1). El equipo está conectado a una columna de cromatografía de gases para monitorear la producción de CO₂, resultado de la respiración del microorganismo y de sus reacciones metabólicas. La demanda de oxígeno se cubre por medio de aeración forzada utilizando compresores con sistemas de regulación de presión para evitar la compactación excesiva del lecho. La geometría y diseño de las columnas permite que sea un equipo barato, debido a que son elaboradas a base de vidrio, por lo que la remoción del calor exotérmico de la fermentación se lleva a cabo de manera eficiente. Requiere de poca cantidad de medio de cultivo y la fácil adaptación del equipo a sistemas más rudimentarios en cuanto a equipamiento y cuantificación de productos, le confiere practicidad de uso.

Sin embargo, para llevar a cabo las lecturas de los parámetros cinéticos durante la fermentación es necesario sacrificar una columna completa, ya que el diseño de la misma no permite tomar muestras. Este equipo es conveniente en las primeras etapas del desarrollo de un bioproceso ya que es adecuado para estudios de caracterización y optimización de la composición del medio de cultivo, y para cuantificar los datos necesarios para llevar a cabo el cálculo de parámetros cinéticos.

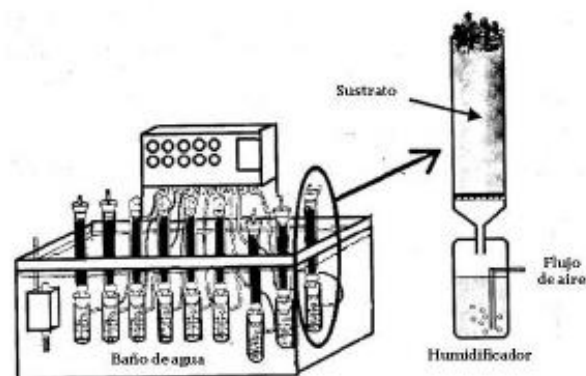


Fig. 1. Bioreactor en columna. Laukevics , J. J., Aspite, A. F., Viesturs, H. E., Tengerdy, R. P. (1984). *Biotechnology and Bioengineering* 26, 2465-2474.

4.2.4 Bioreactor de Columna Estéril. Diseñado por un grupo del Instituto Nacional de la Investigación Agronómica (INRA) en Francia, tomando como base de diseño al bioreactor en columna desarrollado en el año 2000 (Fig. 2). Este bioreactor trabaja con un volumen de 1 litro, cuenta con un muestreador de humedad relativa y un sistema de calefacción en la cabeza de la columna, mientras que en el circuito de operación se encuentra un sistema de enfriamiento, utilizando agua fría, el cual rodea una resistencia de calentamiento.

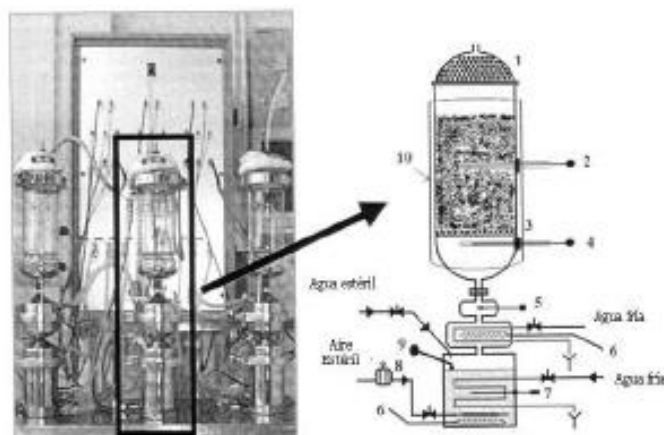


Fig. 2. Bioreactor Estéril (1) tapa de calefacción, (2) termómetro, (3) tamiz de acero, (4) medidor de temperatura del aire en la entrada, (5) medidor de humedad relativa, (6) resistencia, (7) medidor de temperatura de agua, (8) medidor de flujo másico, (9) medidor de nivel, (10) chaqueta aislante. **Laukevics** , J. J., Aspite, A. F., Viesturs, H. E., Tengerdy, R. P. (1984). *Biotechnology and Bioengineering* 26, 2465-2474.

Dichas modificaciones permiten una mejor regulación del contenido de agua durante el proceso. Es posible la toma de muestra de la columna de forma aséptica abriendo la tapa superior, la cual dispone de un dispositivo de flama que impide problemas de contaminación. Se trabaja con varios bioreactores conectados a un sistema de control automático por computadora, el cual regula temperatura, humedad y aireación a través de la cama del sustrato. Debido a que el equipo cuenta con un sistema de control, es adecuado para llevar estudios de perfiles de velocidad de flujo del aire suministrado, así como de temperatura, permitiendo evaluar parámetros necesarios para llevar a cabo estudios de escalamiento.



4.2.5 Tambor horizontal. Uno de los bioreactores en estado sólido más utilizados son los llamados tambor horizontal, el cual se ha diseñado de varias formas: como un contenedor rotatorio, perforado o con paletas, con el fin de obtener una agitación continua del sustrato sólido para incrementar el contacto entre las paredes del bioreactor y el sustrato, así como, proveer mayor oxígeno al microorganismo. Los equipos rotatorios, consisten de un cilindro, con o sin chaqueta con agua para el control de temperatura, el cual gira lentamente volteando al medio de cultivo ayudado de pestañas que se encuentran adheridas a la pared (Fig. 3a). Este tipo de bioreactor presenta dificultades en el control de temperatura y humedad debido a problemas de aglomeraciones de células por ruptura micelial. En cambio los bioreactores de tipo tambor con paletas, vuelve más eficiente la transferencia de oxígeno y disminuye la aglomeración de partículas de sustrato durante el crecimiento microbiano (Fig. 3b). Sin embargo, generalmente, un bioreactor de fermentación sólida con agitación permanente, aunque sea suave, puede modificar la estructura del medio sólido.

Además, dependiendo de la naturaleza de la partícula del soporte sólido, esta agitación puede llegar a ser abrasiva causando daños al micelio. Se han diseñado sistemas continuos de tambor rotatorio con el fin de mejorar los sistemas de control de temperatura y humedad, sin embargo, a medida que aumenta el volumen del sistema fermentativo la remoción de calor por las paredes del bioreactor se vuelve más ineficiente.

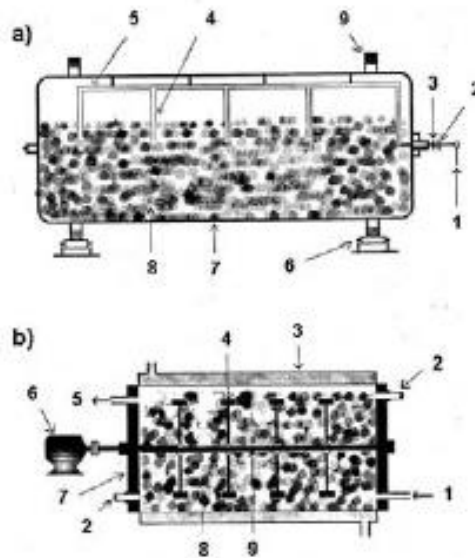


Fig. 3. Bioreactor Tambor horizontal: (a) Rotatorio. (1) Entrada de aire, (2) embalaje rotatorio, (3) conector, (4) boquillas de entrada de aire, (5) línea de aire, (6) rodillos, (7) tambor rotatorio, (8) medio sólido, (9) aro. (Durand, 2003); (b) Con paletas. (1) entrada de aire, (2) medidor de temperatura, (3) chaqueta de agua, (4) paletas, (5) salida de aire, (6) motor para agitación, (7) reactor, (8) medio sólido, (9) árbol de agitación (Durand, 2003). **Laukevics**, J. J., Aspíte, A. F., Viesturs, H. E., Tengerdy, R. P. (1984). *Biotechnology and Bioengineering* 26, 2465-2474.

4.2.6 Bioreactor Zymotis. Diseñado y desarrollado por el grupo (IRD de Francia), el cual consiste de platos verticales por donde internamente hay transferencia de calor debido a la circulación de agua fría, mientras, que el aire previamente temporizado es introducido por el fondo del sistema. Entre cada plato se carga el medio sólido previamente inoculado, dicha cama se mantiene estática durante la fermentación. Este sistema es parecido a los bioreactores de columna, con la diferencia de que las capas de sustrato están verticalmente fijas, por lo tanto es difícil trabajar en condiciones asépticas (Fig. 4). Además, existe mayor posibilidad de que la cama de sustrato presente un encogimiento del volumen durante el crecimiento del micelio, provocando que el contacto con los platos verticales disminuya a medida que la fermentación progrese, lo cual llevaría la formación de canales pobres en transferencia de calor y oxígeno.

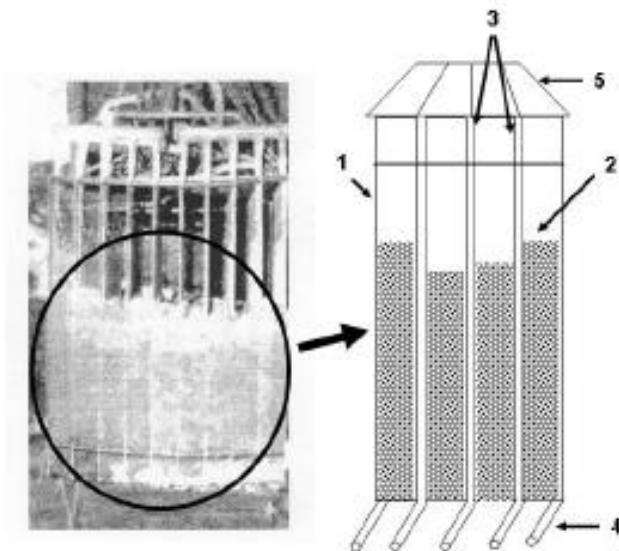


Fig. 4. Bioreactor Zymotis (Durand, 2003). Platos verticales intercambiadores de calor, (2) cama de sustrato, (3) entrada de agua, (4) salida de agua, (5) termostato. **Laukevics**, J. J., Aspite, A. F., Viesturs, H. E., Tengerdy, R. P. (1984). *Biotechnology and Bioengineering* 26, 2465-2474.

4.2.7 Bioreactor Growtek. Es uno de los últimos fermentadores diseñado por el Departamento de Biotecnología, Agricultura e Ingeniería en Alimentos del Instituto Tecnológico de la India, llamado Growtek (Fig. 5). Consiste de un envase de 16 cm de altura y 11.3 cm de diámetro, que tiene un tubo, de 2.6 cm de diámetro y 8.5 cm de altura, pegado a la base con una inclinación de 15° con respecto a la vertical. El cuerpo del recipiente y del tubo externo está hecho de policarbonato, y las tapas de ambos son de polipropileno. Este bioreactor tiene dentro del envase un depósito de polipropileno que contiene una tela de fibra de vidrio en el fondo, donde se sostiene el sustrato. La fermentación ocurre en la vasija cilíndrica y el medio es introducido por el tubo inclinado. Dicho dispositivo también permite la dosificación de agua para mantener la humedad adecuada para el crecimiento microbiano. Sin embargo, no cuenta con un sistema de medición de la variación de temperatura y no es posible la toma de muestra sin descartar toda la cama del sustrato (Kar et al., 1999).

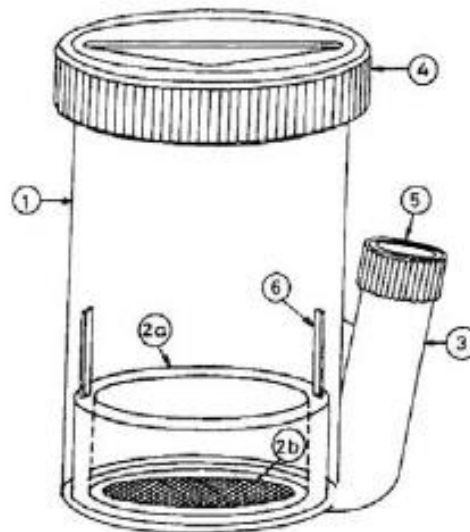


Fig. 5. Bioreactor Growtek. (1) cuerpo del bioreactor de policarbonato transparente, (2a) depósito, (2b) base del depósito perforada donde se deposita el sustrato sólido y el inoculo, (3) tubo lateral que facilita la entrada del medio, (4) tapa enroscada de aireación estéril, (5) tapa enroscada del tubo exterior, (6) mangos del depósito (Kar et al., 1999). **Laukevics** , J. J., Aspite, A. F., Viesturs, H. E., Tengerdy, R. P. (1984). *Biotechnology and Bioengineering* 26, 2465-2474.

4.2.8 Bioreactor para proceso continuo. Van de Lagemaat y Pyle (2001) propusieron un proceso de fermentación en medio sólido basado en la producción continua de la enzima tanasa. Este trabajo explora el diseño de bioreactores de régimen continuo a escala laboratorio y cuyo principio es el empleo de un tornillo sin fin que sirve para alimentar y agitar los sustratos los cuales pueden o no ser inoculados en el proceso. Los estudios correspondientes de mezclado, crecimiento fúngico y niveles de esporulación han sido llevados a cabo en condiciones exitosas de operación continua, debido a que el tiempo de residencia del complejo sustrato-microorganismo-enzima es menor que en los bioreactores convencionales y al estar en condiciones cerradas la asepsia es mayor. En cambio, existe la formación de gradientes de temperatura que no permiten un sistema homogéneo de transferencia de calor. Actualmente, el interés hacia este tipo de bioreactores ha permitido el desarrollo de procedimientos que permitan la optimización del proceso de fermentación en cultivo sólido.



4.2.9 Bioreactor Columna-Charola. Diseño realizado en el Departamento de Investigación en Alimentos de la Universidad Autónoma de Coahuila. El cual consiste de una columna de 13 pulgadas de altura y un diámetro de 10 pulgadas (Fig. 6). En su interior se encuentran ocho charolas perforadas, las cuales tiene una capacidad de 140 mL cada una. La transferencia del oxígeno es por burbujeo a través de un distribuidor de aire, permitiendo la transferencia a un flujo de 194 mL/min. La temperatura es regulada por una chaqueta de enfriamiento y/o calentamiento, por lo que es posible controlar y medir los cambios de temperatura. Bajo este sistema se permite una mejor distribución de oxígeno por aireación hacia las charolas.

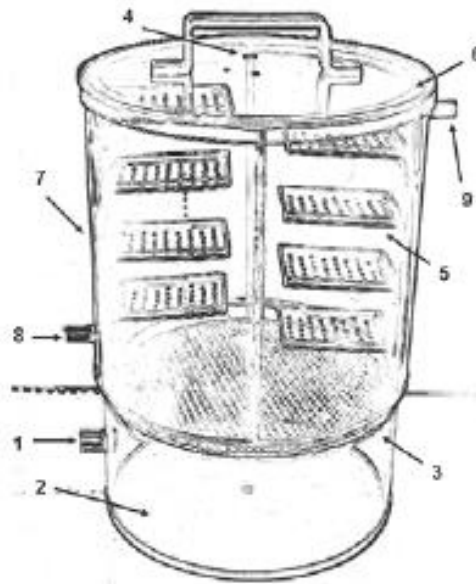


Fig. 6. Bioreactor Columna Charola. (1)Entrada de aire estéril, (2) entrada de agua estéril, (3) distribuidor de aire, (4) entrada para el termómetro, (5) charola, (6) chaqueta para el control de temperatura, (7) columna de acrílico, (8) entrada de agua, (9) salida de agua. **Laukevics** , J. J., Aspíte, A. F., Viesturs, H. E., Tengerdy, R. P. (1984). *Biotechnology and Bioengineering* 26, 2465-2474.

4.2.10 Bioreactor Biocon. Biocon diseñó, desarrolló y patentó un nuevo bioreactor llamado PlaFactor™ en el 2003 para llevar a cabo fermentaciones usando matrices sólidas. El sistema fue higiénicamente diseñado y automatizado para un proceso de cultivo en charola, el cual ya es utilizado eficientemente en plantas industriales, en el desarrollo de productos de uso



alimenticio. La fermentación se lleva a cabo en un bioreactor controlado por computadora. Todas las operaciones del proceso fermentativo, como esterilización, enfriamiento, inoculación, control, recuperación de producto y post-esterilización, se realiza en un solo equipo. El equipo consta de charolas selladas colocadas una sobre la otra formando dos torres unidas por un eje central. Cada módulo cuenta con un brazo de mezclado, el cual rota alrededor axialmente, y con canales de remoción de calor metabólico, control de humedad, aireación y vapor para la esterilización. Este equipo fue diseñado con el objetivo de reemplazar los cuartos de incubación por un equipo más compacto.

El equipo de PlaFactor TM es un sistema que cuenta con estudios del uso cultivos sólidos para la producción de agentes de biocontrol y productos farmacéuticos a nivel industrial, lo cuales requieren altas condiciones de asepsia y condiciones de alta precisión.

4.2.11 Bioreactor de lecho fluidizado. Sistema de operación en modo continuo el cual puede ser operado por altos periodos de tiempo a un alto valor de productividad. Los primeros bioreactores constaban de un cilindro de vidrio, con o sin chaqueta, llenado por una carga completa de lecho o sustrato, sin embargo causaba problemas de compactación similares a los presentados en los equipos de cama empacada. Las variaciones en el lecho han permitido un mejor funcionamiento de este sistema, ya que se utilizan pedazos de esponjas, troncos naturales (loofa, coyonoxtle), polímeros sintéticos (espumas de poliuretano, poliestireno), así como también canastas o cajas delgadas de acero inoxidable, que cuenten con perforaciones que permiten tener una eficiente inmovilización de las células en el soporte con el medio de cultivo. Dichos soportes son llenados por el medio sólido a fermentar, los cuales fueron previamente colocados a lo largo del contenedor.



El principio del diseño se basa en proveer agitación y aireación por flujo forzado de aire proveyéndolo por la parte del cilindro a través de una bomba. El sistema provee un incremento en la transferencia de oxígeno a la cama de sustrato, sin embargo, se presenta daño al inoculo por causa del gran esfuerzo de corte generado, además de que se forman gradientes de temperatura a través de la columna que pueden afectar al producto deseado.

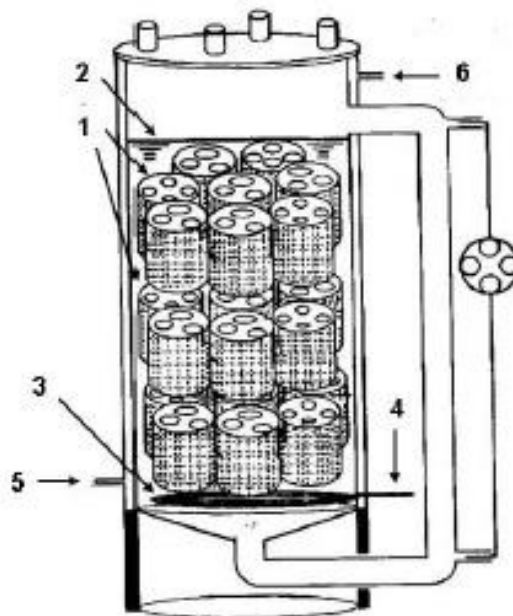


Fig. 7. Bioreactor de lecho fluidizado utilizando loofa como soporte. (1)Camas de esponja de loofa, (2) medio de cultivo, (3) difusor de aire, (4) entrada de aire, (5) Entrada de agua, (6) salida de agua (Ogbonna, 2001). **Laukevics** , J. J., Aspite, A. F., Viesturs, H. E., Tengerdy, R. P. (1984). *Biotechnology and Bioengineering* 26, 2465-2474.

Existe un gran interés por llevar a cabo diseño de bioreactores a nivel laboratorio que puedan ser escalados para su uso a nivel industrial, por lo que se han llevado a cabo investigaciones para determinar los aspectos de ingeniería que afectan a la fermentación en medio sólido ya que es un sistema denominado de las tres E's: energético, económico y ecológico. Por lo que, las principales investigaciones en esta área se han estado llevando a cabo, principalmente, en Asia debido a su gran interés de aprovechar sus residuos agroindustriales, además de los altos rendimientos de productividad que se obtienen a partir de estos bioprocesos y en algunos casos mayores que los reportados por fermentación en medio líquido.



Sin embargo, los avances en el diseño de equipos que permitan el desarrollo de una fermentación en medio sólido han sido pocos y variados en cuanto a sus características, debido al principio fundamental de trabajar con matrices sólidas que limitan la predicción de parámetros trascendentales como el oxígeno y la temperatura. Siendo de gran relevancia el combinar el desarrollo del bioreactores para FMS con los estudios llevados a cabo para un mayor entendimiento de los fenómenos de transporte que afectan el diseño de los sistemas fermentativos. Por lo tanto, se han desarrollado modelos de sistemas en medio sólido, buscando cuantificar las variables que permitan optimizar al bioproceso sin embargo, aún no han sido aplicados para la construcción de bioreactores a escala industrial, debido a que es necesario crear los equipos con mayor automatización.

Aunque, es bien sabido que los sistemas de fermentación en medio sólido difícilmente desbancarán a los sistemas líquidos, por los costos a nivel industrial que estos involucrarían, el diseño de bioreactores permitirá tener otras alternativas tecnológicas para las futuras empresas biotecnológicas del mundo, que tengan nuevas y mejores aplicaciones tecnológicas que permitan una mayor apertura a la comercialización de los mismos.

4.2.12 Diseño estándar de bioreactores. Los líquidos se agitan con más frecuencia en algún tipo de tanque o recipiente, por lo general de forma cilíndrica y provisto de un eje vertical. La parte superior del tanque puede estar abierta al aire; pero generalmente está cerrada. Las proporciones del tanque varían bastante, dependiendo de la naturaleza del problema de agitación. Sin embargo, en muchas situaciones basadas en experimentaciones de diseños anteriores se utiliza un diseño estandarizado como el que se muestra en la figura 9. El fondo del tanque es redondeado, no plano, para eliminar las esquinas o regiones agudas en las que no penetrarían las corrientes de fluido. La profundidad (o altura) del líquido es aproximadamente igual al diámetro del tanque. Un agitador va instalado sobre un eje suspendido, es decir, un eje



sostenido en la parte superior. El eje es accionado por un motor, a veces directamente conectado al eje.

4.2.13 El Teorema de Π (pi) de Vaschy-Buckingham. Es el teorema fundamental del análisis dimensional. El teorema establece que dada una relación física expresable mediante una ecuación en la que están involucradas n magnitudes físicas o variables, y si dichas variables se expresan en términos de k cantidades físicas dimensionalmente independientes, entonces la ecuación original puede escribirse equivalentemente como una ecuación con una serie de $n - k$ números adimensionales contruidos con las variables originales. Este teorema proporciona un método de construcción de parámetros adimensionales, incluso cuando la forma de la ecuación es desconocida. Se siguen los siguientes pasos generales:²⁰

1. Contar el número de variables dimensionales n .
2. Contar el número de unidades básicas (longitud, tiempo, masa, temperatura, etc.) k
3. Determinar el número de grupos adimensionales. Número de $r = n - k$.
4. Hacer que cada número Π_i dependa de $n - m$ variables fijas y que cada uno dependa además de una de las m variables restantes (se recomienda que las variables fijas sean una del fluido, una geométrica y otra cinemática).
5. El número Π que contenga la variable que se desea determinar se pone como función de los demás números adimensionales.
6. El modelo debe tener sus números adimensionales iguales a los del prototipo para asegurar similitud.
7. Se determina la dependencia del número adimensional requerido experimentalmente.²¹

- ²⁰ Vaschy, A.: "Sur les lois de similitude en physique". Annales Télégraphiques 19, 25-28 (1892)
- ²¹ Buckingham, E.: On physically similar systems. Illustrations of the use of dimensional equations. Physical Review 4, 345-376 (1914).



4.4 Marco conceptual

Para implementar un reactor en un proceso hay que:

1. Diseñarlo.
2. Hacerlo construir.
3. Mantenerlo en operación

En el diseño del reactor es necesario

- Seleccionar el tipo
- Dimensionar
- Realizar el diseño o ingeniería de detalle

La selección del tipo de reactor tiene por objeto maximizar el rendimiento material, es decir, dependiendo de las condiciones en las que se realice el proceso se obtiene un alto o bajo porcentaje de eficiencia. Para ello hay que considerar:

- a) Las características de la reacción: Las reacciones químicas varían radicalmente según el número de las fases presentes, el mecanismo de reacción (una o varias etapas), la existencia de equilibrios, los efectos térmicos y la sensibilidad a las condiciones físicas (presión, temperatura, agitación, etc.) Estas características imponen serias dificultades en el diseño del reactor, principalmente cuando se quiere preservar la seguridad tanto del proceso como la de persona que va a realizar el montaje de dicho proceso, además de esto se tiene que tener presente el concepto de optimizar el rendimiento y los costes.
- b) Aspectos técnicos (agresividad del medio donde se realizara el proceso, naturaleza de los materiales, fácil manipulación, fácil montaje, mantenimiento simple, duradero, resistente).



- c) Económicos (materiales disponibles en el mercado, producción, costes de la energía, construcción). Todo ello empíricamente viene englobado en la afirmación que indica que para grandes producciones unidades continuas y para pequeñas producciones unidades discontinuas, esto claro esta parte del punto de que a escala de laboratorio se facilita la producción de unidades discontinuas pero a gran escala o grandes producciones el proceso se ve muy beneficiado al trabajar de manera continua.²²

En este proyecto se siguieron los pasos anteriores para lograr un diseño apropiado, acorde con las especificaciones técnicas, las condiciones del proceso y otros aspectos resaltantes como la economía. Todo esto pensando en que el proceso de producción de bioetanol se lleve en las mejores condiciones para obtener un buen resultado final.

²² Levenspiel, O. "Ingeniería de las reacciones químicas". Ed. Reverté, 1990.
Levenspiel, O. "Chemical Reaction Engineering 3rd Ed". Wiley, 1998.



5 DISEÑO METODOLOGICO

Fase 1	Revisión bibliográfica	Antecedentes de reactores construidos
		Teoría del diseño del bioreactor
		Selección del método de diseño
Fase 2	Diseño del bioreactor	Lluvia de ideas
		Selección de ideas viables
		Clasificación de la ideas
		Selección de la idea
		Diseño del bioreactor
		Análisis de ingeniería
		Cálculos
		Selección de materiales y motor
Fase 3	Desarrollo de planos CAD del bioreactor	Modelamiento
		Desarrollo de planos

5.1 METODOLOGÍA PROPUESTA

Se planteó una metodología dividida en 3 fases principales compuesta por una fase inicial o fase 1 de recopilación de información donde se recoge todos los requisitos necesarios para el diseño del bioreactor pero también se tuvo en cuenta especificaciones particulares del proceso. Una fase 2 donde a partir de una lista de ideas, se analizó las mejores alternativas, se escogió la mejor propuesta y se procedió a realizar el diseño del bioreactor. Y por último una fase 3 que incluye el desarrollo de los planos CAD del dispositivo diseñado.



5.1.1 Fase 1

5.1.1.1 Revisión bibliografía. Se investigó la bibliografía pertinente para encontrar antecedentes de reactores construidos para procesos similares y se estudió la ciencia detrás de estos diseños para tomar las mejores características de ellos y combinarlas con especificaciones precisas que se requieren para este proceso de producción de bioetanol a partir de materia orgánica como son longitud de las aspas y visibilidad del proceso.

5.1.2 Fase 2

5.1.2.1 Diseño del bioreactor. Luego de revisar la bibliografía referente al diseño del bioreactor se procedió a plantear ideas para el diseño más adecuado de este bioreactor, teniendo en cuenta el proceso para el cual se diseñara ya que esto puede modificar ciertas características del bioreactor como las dimensiones, geometría de las aspas, entre otros. La mejor opción deberá tener ventajas como la facilidad de conseguir los materiales y componentes para la construcción y tratar de ser lo más simple posible en el montaje.

Se realizó un diseño adecuado del bioreactor para el proceso teniendo en cuenta parámetros tales como: selección de materiales idóneos, tipo de aspas de agitación, velocidad de agitación, sellado hermético, forma geométrica, posición de sensores y medidores de presión, entre otros. Se procedió a realizar cálculos pertinentes para el diseño como son las dimensiones y la potencia necesaria para el sistema de agitación para así realizar la construcción de los sólidos de manera digital mediante un software de diseño mecánico, esto es necesario para desarrollar los planos CAD.



5.1.3 Fase 3

5.1.3.1 Desarrollo de planos CAD del bioreactor. Luego del diseño del bioreactor se procedió a realizar un modelo CAD del mismo para tener el bioreactor en un medio virtual donde se le pueda realizar en un futuro cualquier tipo de estudio, también se desarrolló planos en el mismo software para ver algunas medidas y tener una mejor visión del dispositivo diseñado, los planos finales son determinados por el análisis de las condiciones a las cuales será sometido el reactor como: volumen final, densidad, viscosidad, reología del sustrato, entre otros.



6. RESULTADOS

6.1 Selección de parámetros:

Luego de un análisis aproximado de los diferentes aspectos de beneficio como su fácil montaje, su funcionalidad y fácil mantenimiento y de observar las posibles alternativas para el diseño de este bioreactor se llegó a una conclusión para la selección de los parámetros y así poder seleccionar los materiales, el motor del sistema de agitación y dimensiones.

6.2 Selección de materiales:

Uno de los materiales seleccionados para la parte superior del bioreactor o tapa, es el acrílico de 20 mm gracias a sus características de transparencia y resistencia es adecuado para el proyecto. Algunas de las propiedades que caracterizan estas láminas son:

- Apariencia: claridad y transparencia.
- Resistencia a la intemperie: no se afecta por el sol, lluvia, frío o calor extremo.
- Resistencia química: resistencia al ataque de gran variedad de productos químicos, tales como el thinner, benceno, alcohol etílico, cetonas entre otras.
- Propiedades eléctricas: es excelente aislante
- Ligereza y transmisión de luz: las láminas de acrílico cristal tiene un 92% de transmisión de luz lo que nos permite mayor nitidez.
- Resistencia a esfuerzos mecánicos: no se destorma, ni se astilla al romperse lo que permite que sea más seguro y menos riesgoso.
- Material plástico: debido a esta propiedad es fácil de formar, puede ser cortado, perforado y maquinado.
- Ambiental: puede reciclarse en su totalidad (100%) lo que ayuda al cuidado del planeta.



Para el tanque contenedor del bioreactor se usaría el acero inoxidable refractario 316L²³ por sus características particulares.

El acero inoxidable 316L contiene una adición de molibdeno, en un 2% y lo convierte en un material mucho más resistente a la corrosión por picado y por rendijas. El 316 es muy resistente a la corrosión bajo tensiones (corrosión que combina normalmente tres factores: medio agresivo, en el caso de los fabricantes, cloruros, temperatura y, como el nombre lo indica, tensiones, sean estas aplicadas o residuales del proceso de fabricación)

De las características principales podemos resaltar:

Características generales:

- Los aceros inoxidables refractarios se utilizan en la fabricación de piezas diseñadas para trabajar a elevadas temperatura cercanas a las 2000° F
- Austenítico.

Características pertinentes al proceso:

- Buena resistencia a la corrosión.
- Permite el manejo de productos químicos y celulosa.
- Se puede esterilizar.
- Permite el manejo de microorganismos vivos.²⁴

²³ http://www.metalesindustriales.com/media/File/aceros_inoxidables.pdf

²⁴ http://www.metalesindustriales.com/media/File/aceros_inoxidables.pdf



6.4 Aspas y forma geométrica del bioreactor y del sistema de agitación:

Para el diseño estándar de un tanque agitado se dispone de un gran e inusual número de elecciones sobre el tipo y localización del agitador, las proporciones del tanque, el número y las proporciones de los deflectores.

Según el diseño “estándar” de turbina el diseñador de un tanque agitado dispone de un gran e inusual número de elecciones sobre el tipo y localización del agitador, las proporciones del tanque, el número y las proporciones de los deflectores y otros factores. Cada una de estas decisiones afecta la velocidad de circulación del líquido, los patrones de velocidad y el consumo de potencia. Como punto de partida para el diseño de los problemas ordinarios de agitación, generalmente se utiliza un agitador de turbina como el que se observa en la figura 9.²⁵

Los líquidos se agitan con más frecuencia en algún tipo de tanque o recipiente, por lo general de forma cilíndrica y provisto de un eje vertical. La parte superior del tanque puede estar abierta al aire; pero generalmente está cerrada. Las proporciones del tanque varían bastante, dependiendo de la naturaleza del problema de agitación. Sin embargo, en muchas situaciones basadas en experimentaciones de diseños anteriores se utiliza un diseño estandarizado como el que se muestra en la figura 9. El fondo del tanque es redondeado, no plano, para eliminar las esquinas o regiones agudas en las que no penetrarían las corrientes de fluido. La profundidad (o altura) del líquido es aproximadamente igual al diámetro del tanque. Un agitador va instalado sobre un eje suspendido, es decir, un eje sostenido en la parte superior. El eje es accionado por un motor, a veces directamente conectado al eje.

²⁵ **Relaciones estandar para las dimensiones del bioreactor.** Extraída de McCabe, Operaciones unitarias en ingeniería química, capítulo Agitación y mezcla de líquidos, séptima edición, 2007.



En el estudio de la física, para resolver algunos problemas es necesario establecer algunas hipótesis o consideraciones que son objetables. A través de esto obtenemos soluciones aproximadas a los resultados reales. Para los casos en los que estas soluciones aproximadas no resultan adecuadas se requiere utilizar las ecuaciones completas sin consideraciones. Sin embargo, la solución de dichas ecuaciones es extremadamente difícil y en muchos casos imposible con los métodos más elaborados, por lo que muchas veces es necesario basarse en resultados experimentales. El desarrollo de muchas de las ramas de la física (como la mecánica de fluidos) ha dependido de los resultados experimentales porque muy pocos problemas reales pueden resolverse de manera exacta únicamente por métodos analíticos. La solución de problemas físicos reales implica una combinación de información analítica (teórica) y experimental. En general, primero se aproxima la situación física real con un modelo matemático que sea suficientemente simple para obtenerse una solución. Después se efectúan mediciones experimentales para verificar la validez de los resultados analíticos. Basándose en estas mediciones, se pueden hacer refinamientos al análisis y después se sigue verificando experimentalmente la validez de los resultados que se van obteniendo. Los resultados experimentales son esenciales en este proceso. Además, soluciones sin una revisión de los datos experimentales disponibles usualmente son malas y poco adecuadas para aplicar.

Por otro lado, la obtención de datos experimentales en laboratorio no siempre es posible o es muy cara y requiere de mucho tiempo. Por lo que normalmente se trata de obtener la mayor información posible del mínimo número de experimentos. El análisis dimensional es una de las herramientas que existe para lograr este objetivo. Los parámetros adimensionales que se obtienen sirven para correlacionar los datos y encontrar una presentación objetiva con el mínimo número posible de representaciones gráficas.



Basándose en lo anteriores se estimo que las proporciones típicas de un bioreactor son:

$$\begin{array}{ccc} \frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3} & \frac{H}{D_t} = 1 & \frac{j}{D_t} = \frac{1}{12} \\ \frac{E}{D_t} = \frac{1}{3} & \frac{W}{D_a} = \frac{1}{5} & \frac{L}{D_a} = \frac{1}{4} \end{array} \quad \text{Ecuación 1.}^{26}$$

Estas relaciones son importantes tenerlas en cuenta como referencia para el diseño de bioreactores ya que estan basadas en el buen funcionamiento de dispositivos ya construidos, pero pueden alterarse minimamente para que se acoplen a procesos especificos y asi puedan cumplir con todas las especificaciones tecnicas y de adecuacion. A continuacion se muestra la figura donde se observa cada variable de la ecuacion anterior.

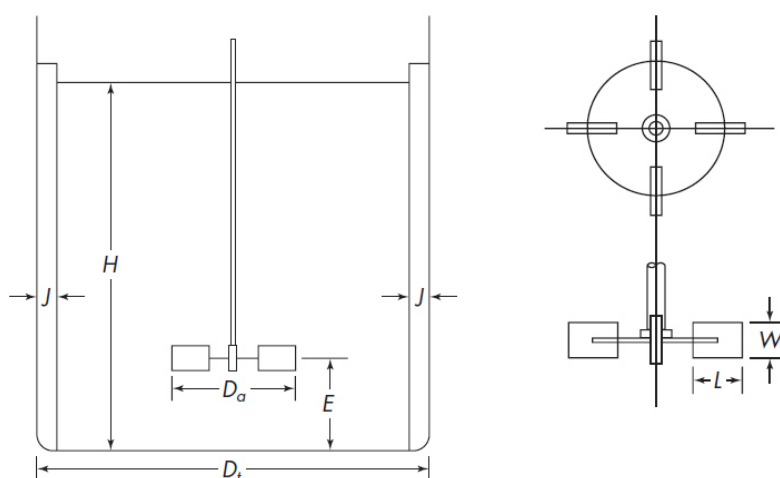


Fig 9. McCabe, Operaciones unitarias en ingeniería química, capítulo Agitación y mezcla de líquidos, séptima edición, 2007

²⁶ **Relaciones estandar para las dimensiones del bioreactor.** Extraida de McCabe, Operaciones unitarias en ingeniería química, capítulo Agitación y mezcla de líquidos, séptima edición, 2007.



Tabla 6. Dimensiones del bioreactor y espesores de componentes.

Diámetros	Alturas	Espesores
Dt = 609,52 mm	E = 1/3 Dt = 203,17 mm	J= 1/12 Dt = 50,79 mm
Da = 1/3 Dt = 203,17 mm	H = 601,59 mm	W = 1/5 Da = 40,63 mm
		L = 1/4 Da = 50,79 mm

Partiendo de la medida Dt la cual es 609,52 mm esto tomando como base la cantidad de materia que queremos procesar. La medida Da y L se modificaron por requerimientos estrictos del proceso ya que el material a manejar es irregular y heterogéneo, la distancia Da paso a ser 300mm y L paso a ser de 100mm. El bioreactor es de forma cilíndrica para evitar las esquinas y así eliminar zonas ciegas o lugares donde pueda existir un estancamiento del fluido, el número más común o generalizado de deflectores son 4, las aspas o agitadores para este tipo de fluido de esta alta viscosidad normalmente son aspas rectas por su mayor resistencia al fluido.

6.5 Sellado hermético:

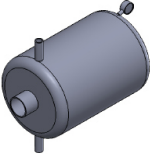
El sellado del bioreactor es crucial para la efectividad del proceso ya que se requiere que el proceso se lleve a cabo de manera anaeróbica, es por eso que el sellado de este bioreactor consta de dos partes. Una primera parte es la ubicación de un retenedor de caucho nitrilo en el acople entre el eje central del sistema de agitación y la tapa del bioreactor. Una segunda parte es el sello entre la tapa de acrílico y el vaso contenedor de acero inoxidable, para esto requerimos al uso de un sello o empaque de neopreno por todo el borde de la tapa y a su vez para mantener dicha tapa en su posición usamos unos pines de presión para asegurar que todo se mantenga junto y fijo para que el proceso se lleve a cabo de manera efectiva.



6.6 Selección del diseño:

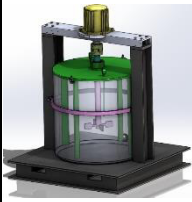
Se construyó una tabla con las dos alternativas más cercanas a los requisitos técnicos del diseño y usando dos de las formas más comunes en los bioreactores una para escala de laboratorio y otra para escala industrial o semi industrial y se le asignaron calificaciones a las características más importantes y vitales para el diseño del bioreactor. Se asignó a criterio una escala de calificación es de 1 a 5 teniendo como 1 la peor calificación y 5 como la mejor calificación. Para esta selección también se tuvo en cuenta el proceso para el cual será utilizado el dispositivo, ya que este proceso dicta la mayoría de las especificaciones necesarias para el desarrollo del diseño, aparte de esto también fue tenido en cuenta recomendaciones específicas del proceso de producción de bioetanol a partir de desechos orgánicos, ya que este proceso necesita condiciones particulares.

Tabla 7. Alternativa 1

NOMBRE	BOSQUEJO	DESCRIPCION	CRACTERISTICAS		CALIF (1-5)
BIOREACTOR HORIZONTAL		<p>Es un Reactor cilindrico posicionado de manera horizontal con un rodete de flujo radial, se utiliza un agitador de turbina abierta de palas rectas, con un mezclado manual construido todo en aluminio, tiene manometro y termometro; tiene un alojamiento para evacuacion del sustrato y dos alojamientos para ensamble.</p>	FUNCIONALIDAD	<i>Garantizar un espacio anaerobico.</i>	4
				<i>Se puedan obtener muestras durante el proceso</i>	2
				<i>Se puede monitorear presion y temperatura</i>	5
				<i>Debe tener un elemento agitador</i>	4
				<i>Grantizar la homogeneidad de los procesos en la biomasa utilizada.</i>	2
				<i>Resistencia a soluciones acidas.</i>	3
				<i>Capacidad volumetrica para 10 litros.</i>	5
			MANTENIMIENTO	<i>Desensamble y ensamble rapido</i>	1
				<i>Construcion con elementos comerciales.</i>	2
				<i>Resistente a lavado con agua.</i>	5
			ESTETICA	<i>Dimensiones moderadas (para laboratorio).</i>	5
				<i>Acabados finos.</i>	5
				<i>Facil manipulacion.</i>	2
				<i>Garantiza un funcionamiento seguro.</i>	3
CALIFICACION TOTAL				48	

Se puede observar que esta alternativa tiene ventajas como el monitoreo de las variables de presión y temperatura y los buenos acabados que evita asperezas y alta fricción con la materia pero se dificulta la manipulación y la extracción de muestras ya que no tiene un acceso para tomar muestras durante el proceso.

Tabla 8. Alternativa 2

NOMBRE	BOSQUEJO	DESCRIPCION	CRACTERISTICAS		CALIF (1-5)
BIOREACTOR VERTICAL		<p>Es un Reactor cilindrico posicionado de manera vertical con un rodete de flujo radial, se utiliza un agitador de turbina de discos con palas instalado centralmente, posee placas deflectoras, se utiliza un motoreductor para realizar el mezclado, el contenedor cilindrico al igual que la turbina para mezclas estan contruidos en acero inoxidable 316l (low carbon) y la tapa esta contruida en acrilico, tiene manometro y termometro; tiene una base para</p>	FUNCIONALIDAD	Garantizar un espacio anaerobico.	5
				Se puedan obtener muestras durante el proceso	4
				Se puede monitorear presion y temperatura	5
				Debe tener un elemento agitador	4
				Grantizar la homogeneidad de los procesos en la biomasa utilizada.	4
				Resistencia a soluciones acidas.	5
				Capacidad volumetrica para 10 litros.	5
			MANTENIMIENTO	Desensamble y ensable rapido	3
				Construcion con elementos comerciales.	5
				Resistente a lavado con agua.	5
			ESTETICA	Dimensiones moderadas (para laboratorio).	5
				Acabados finos.	5
				Facil manipulacion.	4
				Garantiza un funcionamiento seguro.	4
				CALIFICACION TOTAL	63

Esta alternativa alcanzo un mejor puntaje final, gracias a sus amplias ventajas en funcionalidad, mantenimiento y estética ya que su construcción es con elementos comerciales, fácil manipulación y asegura en un alto porcentaje un proceso eficiente y anaeróbico ya que se rige por las especificaciones técnicas y condiciones requeridas.



6.7 Cálculo de la potencia necesaria:

El bioreactor debe llevar un sistema de agitación ya que esto mejora la eficiencia del proceso ya que crea una homogeneidad de la materia y los microorganismos en el bioreactor. Para el cálculo de la potencia necesaria que requiere este sistema de agitación se debe definir algunas variables que encontraremos en el desarrollo de los cálculos y que serán de vital importancia identificar.

Tabla 9. Variables a utilizar.

Variables
Da = diámetro que forman las aspas.
N = revoluciones por minuto (rpm) o revoluciones por segundo (rps).
μ = viscosidad de la biomasa.
ρ = densidad de la biomasa.
g = gravedad.

Primero se toma la variable de diámetro $D_a = 310\text{mm}$ (1 ft) – Se forma en las aspas de la hélice de acuerdo al diseño.

Según recomendación específica del proceso se toma el número de revoluciones necesarias $N = 120\text{ rpm}$ (2 r/s) – Para garantizar homogeneidad durante el proceso de hidrólisis se necesita un mezclado a 120 rpm.

Debido a que el material a procesar sufrirá un procedimiento parecido al de la fermentación alcohólica se usa una viscosidad $\mu = 25\text{ cP} = 0.24\text{ P}$ (0.016



lb/ft*s)²⁷ – Debido a que la biomasa es una mezcla heterogénea no se puede definir una viscosidad específica por ende tomamos como referencia la viscosidad del vino.

También determinamos que la densidad apropiada para el material debe ser también la de un alcohol fermentándose correspondiente a $\rho = 1040 \text{ Kg} / \text{m}^3$ (64.92 lb/ft³) – Al igual que en el ítem anterior consideramos la densidad del vino.²⁸

Por último tomamos la gravedad de la tierra la cual se determina fija en $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ (32.17 ft/s²) – Gravedad.

Se puede proceder a calcular el número de Reynolds (N_{Re})

Se usa la ecuación del número del Reynolds definida en el texto consultado en el capítulo de diseño de sistemas de agitación en bioreactores.

$$N_{Re} = \frac{D_a^2 n \rho}{\mu} \quad \text{Ecuación 2}^{29}$$

Reemplazando los valores en la ecuación se obtiene

$$N_{Re} = \frac{(1\text{ft})^2 (2\text{r/s})(64.92 \text{ lb/ft}^3)}{0.016 \text{ lb/ft} * \text{s}}$$

Realizando las operaciones y resolviendo la ecuación se obtiene como resultado el valor de:

$$N_{Re} = 8115$$

²⁷ <http://www.atpplleal.com/Pujat/file/VISCOSIDAD.pdf>

²⁸ Mecánica de fluidos. Jean Francois DULhoste. Escuela de ingeniería mecánica

²⁹ **Numero de Reynolds**, Extraída de McCabe, Operaciones unitarias en ingeniería química, capítulo

Agitación y mezcla de líquidos, séptima edición, 2007.

Conociendo el número de Reynolds se utiliza la gráfica de número de potencia (N_p) vs número de Reynolds (N_{Re}) para tanques con 4 placas deflectoras y hélices instaladas centralmente de 4 paletas. Por lo general, el número de deflectores es 4 para material de alta viscosidad; el número de palas del agitador varía entre 4 y 16, pero generalmente son 4 o 6.³⁰

Gráfica de Numero de Reynolds vs número de potencia

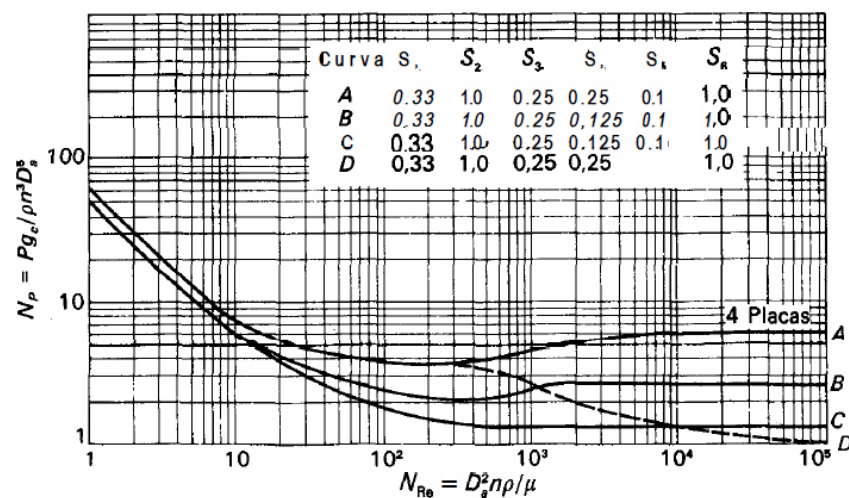


Fig. 11. McCabe, Operaciones unitarias en ingeniería química, capítulo Agitación y mezcla de líquidos, cuarta edición, 1991.

Interceptando en la gráfica la línea de 4 placas con el número de Reynolds resultante, se tiene que:

Para un $N_{Re} = 8115$ el $N_p = 5$, con el número de potencia se puede calcular el consumo de potencia de remplazando en la siguiente ecuación.

$$P = \frac{N_p n^3 D_a^5 \rho}{g} \quad \text{Ecuación 3}^{31}$$

³⁰ **Impulsores** Extraída de McCabe, Operaciones unitarias en ingeniería química, capítulo Agitación y mezcla de líquidos, séptima edición, 2007.

³¹ **potencia requerida**, Extraída de McCabe, Operaciones unitarias en ingeniería química, capítulo Agitación y mezcla de líquidos, séptima edición, 2007.



Reemplazando en la ecuación se tiene que:

$$P = \frac{(5)(2 \text{ r/s})^3(1\text{ft})^5(64.92 \text{ lb/ft}^3)}{32.17 \text{ ft/s}^2}$$

Realizando las operaciones y resolviendo la ecuación se obtiene como resultado:

$$P = 80.7 \text{ ft} * \text{lb/s} = \mathbf{109,4 W}$$

$$P = \mathbf{0.14 Hp}$$

Se puede concluir que para las especificaciones dadas el consumo de potencia es de 109, Watts. Esto para operar según recomendación específica del proceso a N=120 rpm (2 r/s) – Para garantizar homogeneidad durante el proceso de hidrólisis se necesita este mezclado.

6.3 Selección de motor:

Para la selección del motor eléctrico se tiene en cuenta las siguientes consideraciones:

- Que el motor pueda generar la potencia requerida por el sistema.
- Que se pueda variar las RPM antes y durante el proceso.
- Que sea un equipo comercial debido a que si ocurre una avería en alguno de sus componentes, estos se puedan conseguir con facilidad.
- Que sus dimensiones sean moderadas.
- Que sea económicamente viable.

Partiendo de estos mínimos requisitos, un equipo que cumple con todas estas especificaciones es el servomotor HF-SE102BJW1-S100 de Mitsubishi, se decide seleccionar un servomotor debido a que es un motor al cual se le puede



controlar su velocidad de funcionamiento y posición dentro de un rango de operación, con esto podemos garantizar el control de la posición, dirección y velocidad de mezclado en el birreactor.

Este servomotor utiliza corriente alterna, por tal motivo este tipo de servomotores admite voltajes más altos, por lo que son ideales en aplicaciones de alta potencia.

Su geometría y dimensiones brindan un fácil acoplamiento además de una excelente estética, es un equipo comercial y cumple con cada una de las especificaciones mecánicas requeridas, adicional a esto requiere de una fuente de energía y un controlador de movimiento programables o posicionado.

6.4 Tabla de costos

En el mercado internacional podemos encontrar diferente tipos de reactores de biomasa que permiten controlar parámetros en el proceso, cabe resaltar que ninguno de los bioreactores está diseñado para el tratamiento de basura orgánica, pero para tener un punto de referencia encontramos que:

Costos de reactor en el mercado	\$ 8'000.000 - \$12'000.000
Costo de reactor fabricado	\$ 5'000.000 - \$ 7'000.000

El ahorro es notorio, el gasto por fabricación corresponde a un 65% aproximadamente el valor de los bioreactores en el mercado. Estos valores son estimados según ventas online.



6.5 Proceso de fabricación

Para la fabricación de bioreactor se requiere del siguiente proceso:

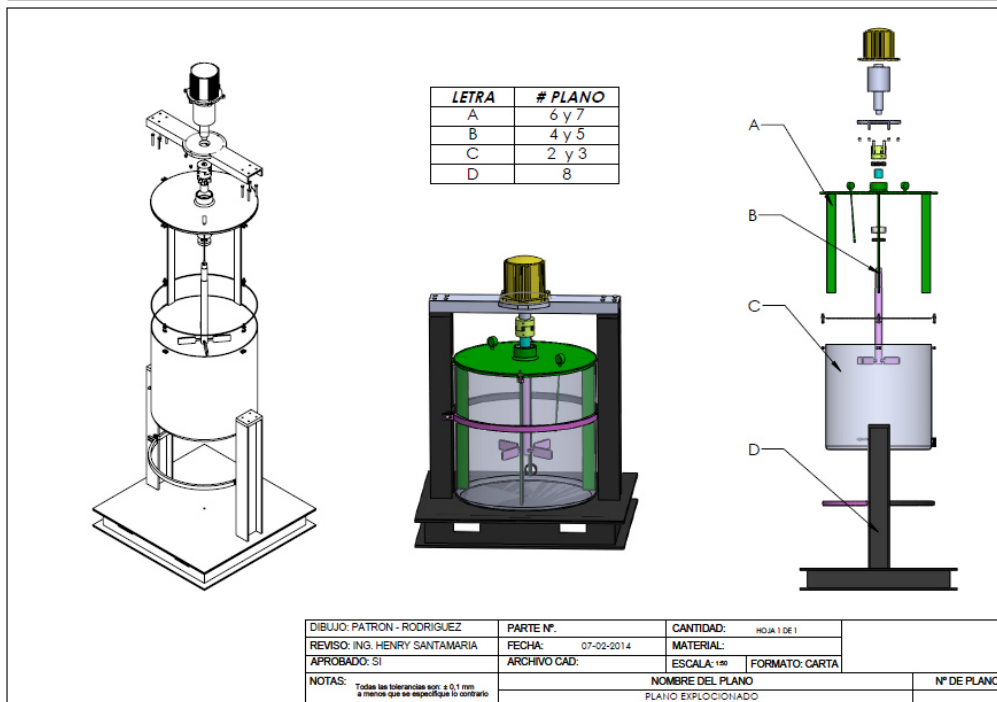
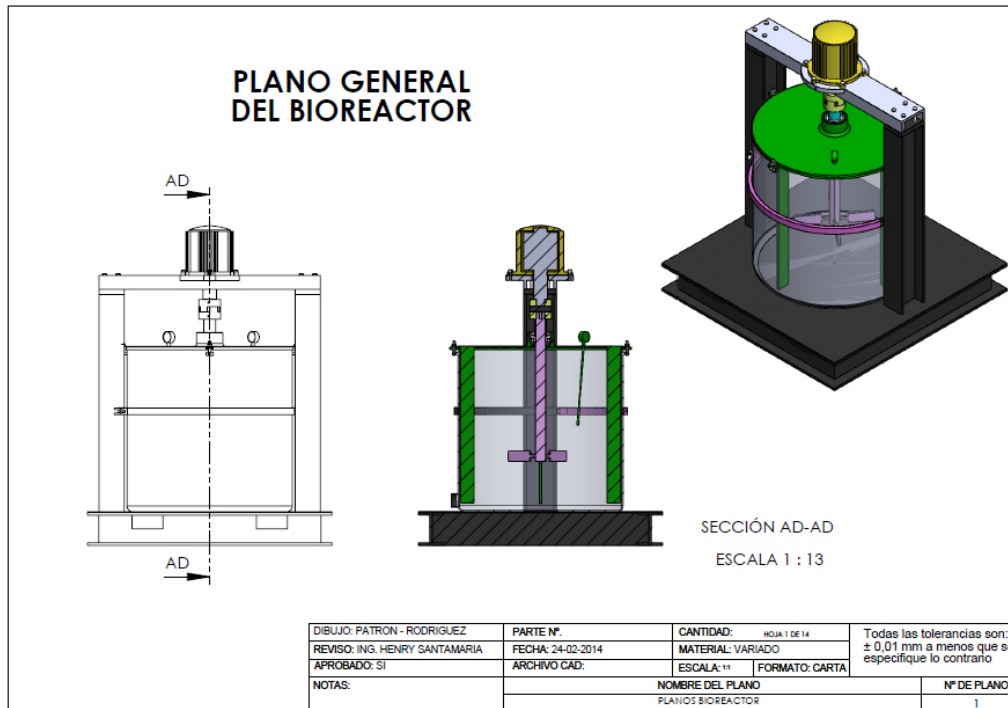
- **Cilindro contenedor.** Se debe fabricar mediante en el dobles de lamina de acero inoxidable 316 L y se suelda con electrodos AWS E308 para darle la forma cilíndrica, posteriormente se suelda la base inferior con el mismo tipo de electrodo para finalmente obtener el contenedor. Los elementos para el sellado de la tapa se deben mecanizar y soldar a la superficie externa del contenedor según planos.
- **Tapa.** La tapa se fabricara en acrílico resistente a ambientes agresivos, se debe mecanizar una lámina y darle los detalles que esta requiera según plano. Los accesorios para el garantizar la hermeticidad del bioreactor se maquinaran por aparte y se adhiere a la superficie de la tapa con pegamento industrial Loctile (el pegamento que elegimos).
- **Eje mezclador.** El eje se obtendrá a partir de mecanizar barra circular de acero inoxidable 316 L, las aspas se fabricaran por separado y serán soldadas con electrodos AWS E308 según plano.
- **Base de cilindro.** La base se construirá a partir de perfil H americanos de ala ancha – ASTM 6/A 6M-07, y lámina galvanizada para la superficie de apoyo según plano.



6.8 Planos detallados:

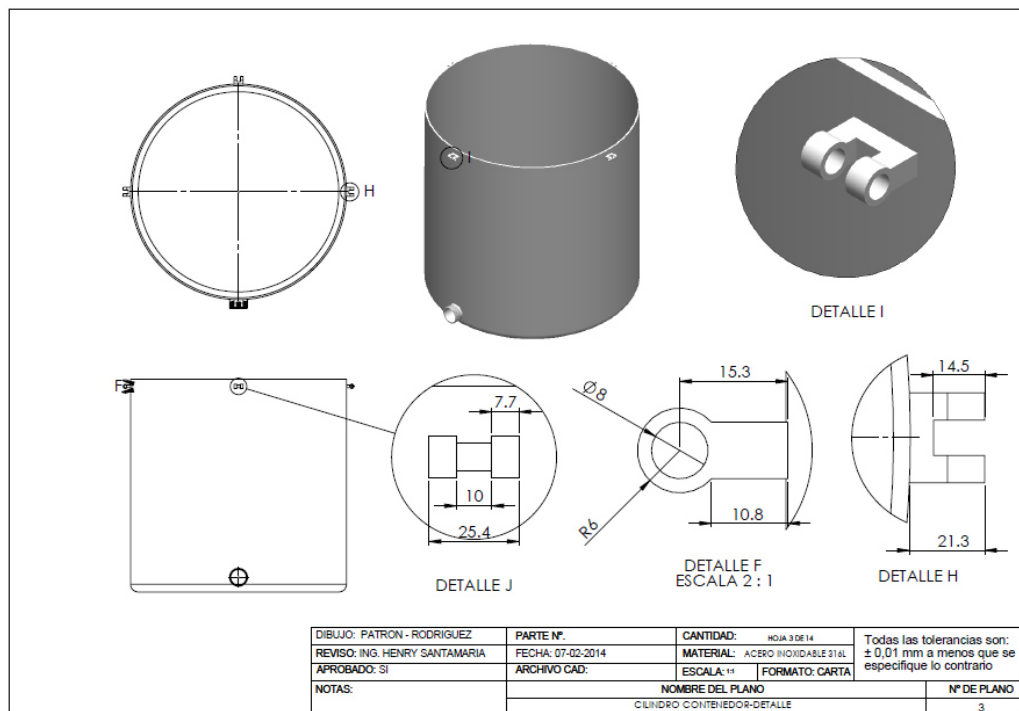
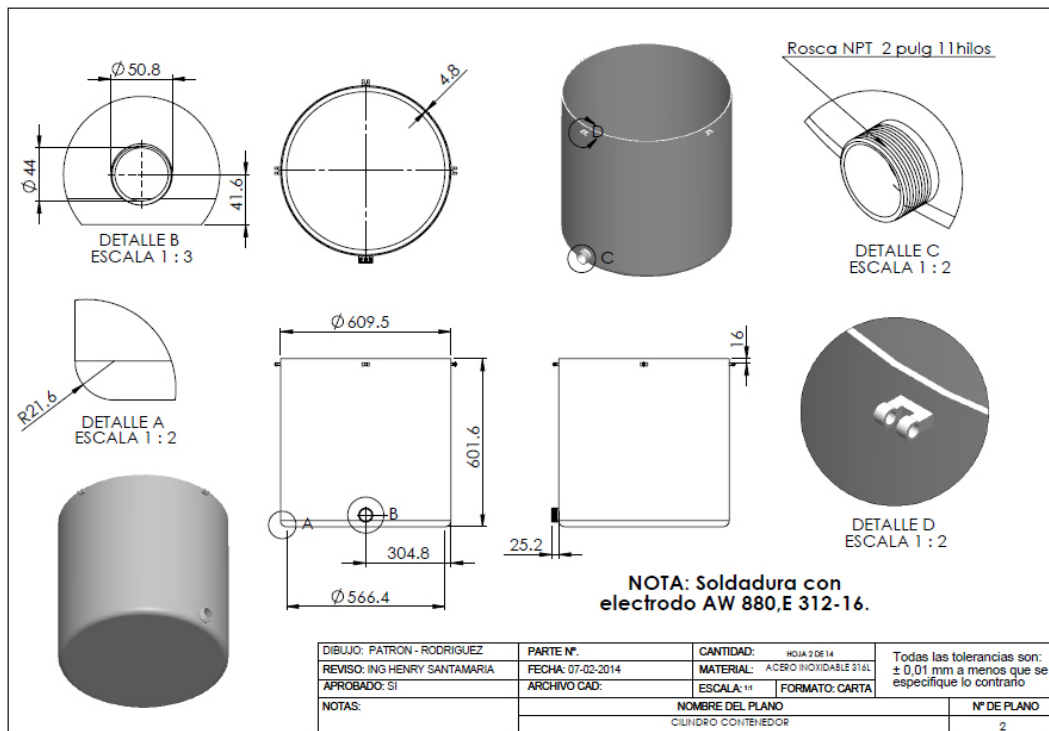
En esta fase se muestran los planos detallado del bioreactor, estos planos fueron desarrollos a partir de los sólidos construidos en el ambiente digital de un software de diseño, todas estas características y dimensiones se basan y se sustentan en la teoría del diseño de los bioreactores y en los cálculos que se realizaron anteriormente y así se determinó las dimensiones del bioreactor y del sistema de agitación y la potencia necesaria que este sistema requiere para funcionar. Cabe resaltar que las unidades de todos los planos a continuación son en milímetros (mm).

Plano 1



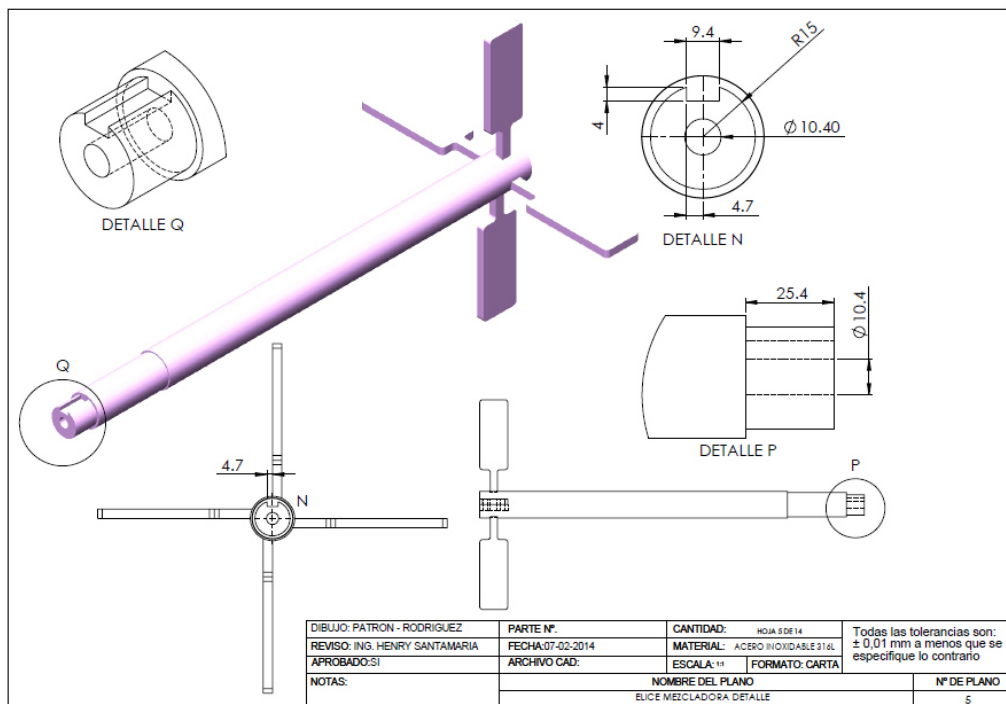
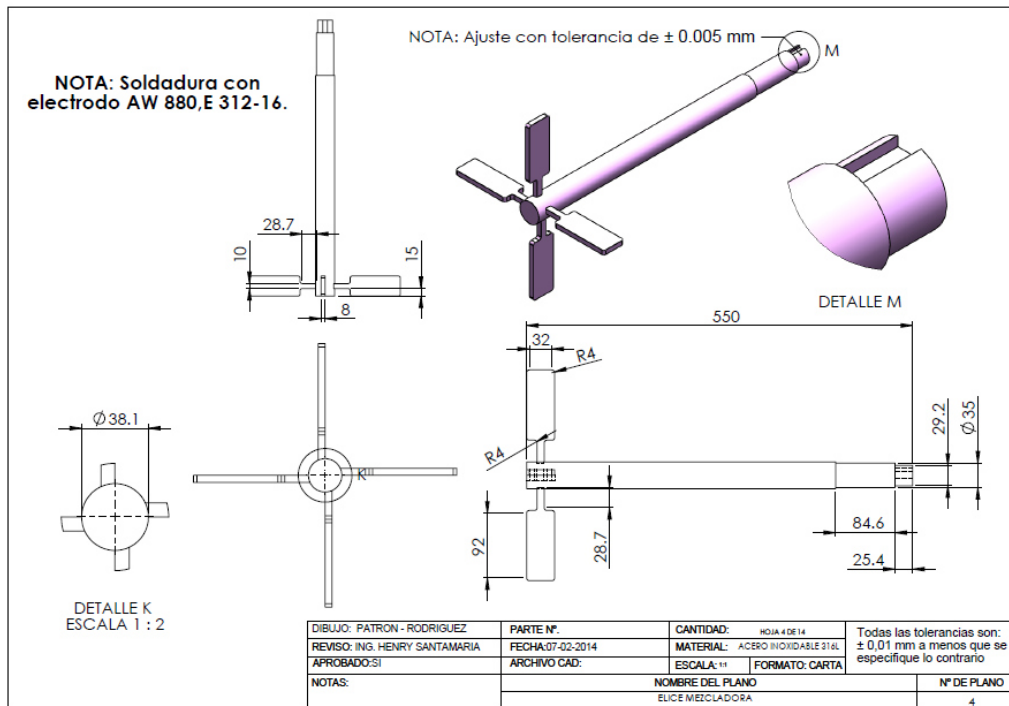
Este es un plano general de todo el bioreactor donde se puede observar una vista isométrica y explosionada donde se permite percibir todo el dispositivo de manera general y una vista de corte que posibilita ver lo que la vista isométrica no permite.

Plano 2



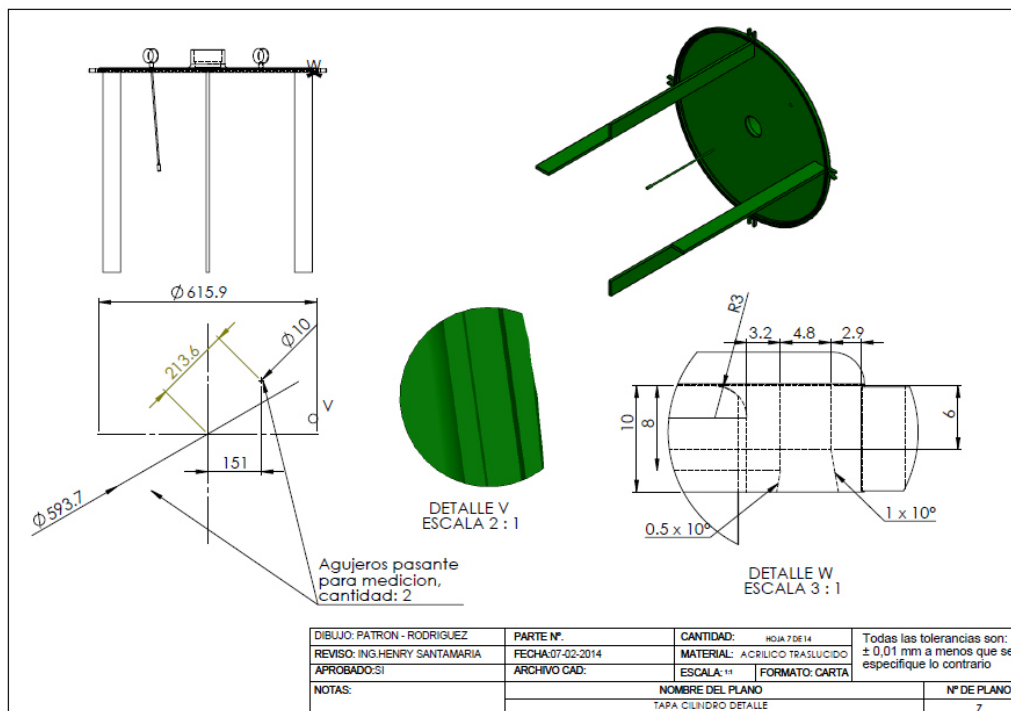
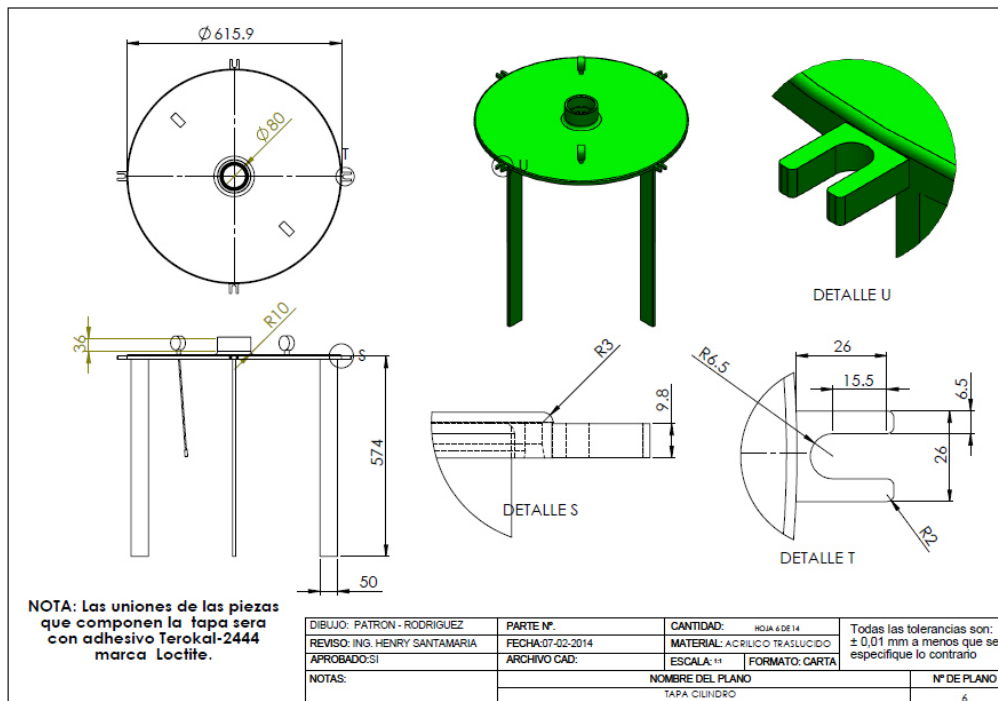
Estos son los planos del vaso contenedor que se diseñó para el bioreactor, se puede observar sus dimensiones y algunos de los detalles importantes como lo son el agujero de desagüe y el sistema donde se asegura la tapa.

Plano 3



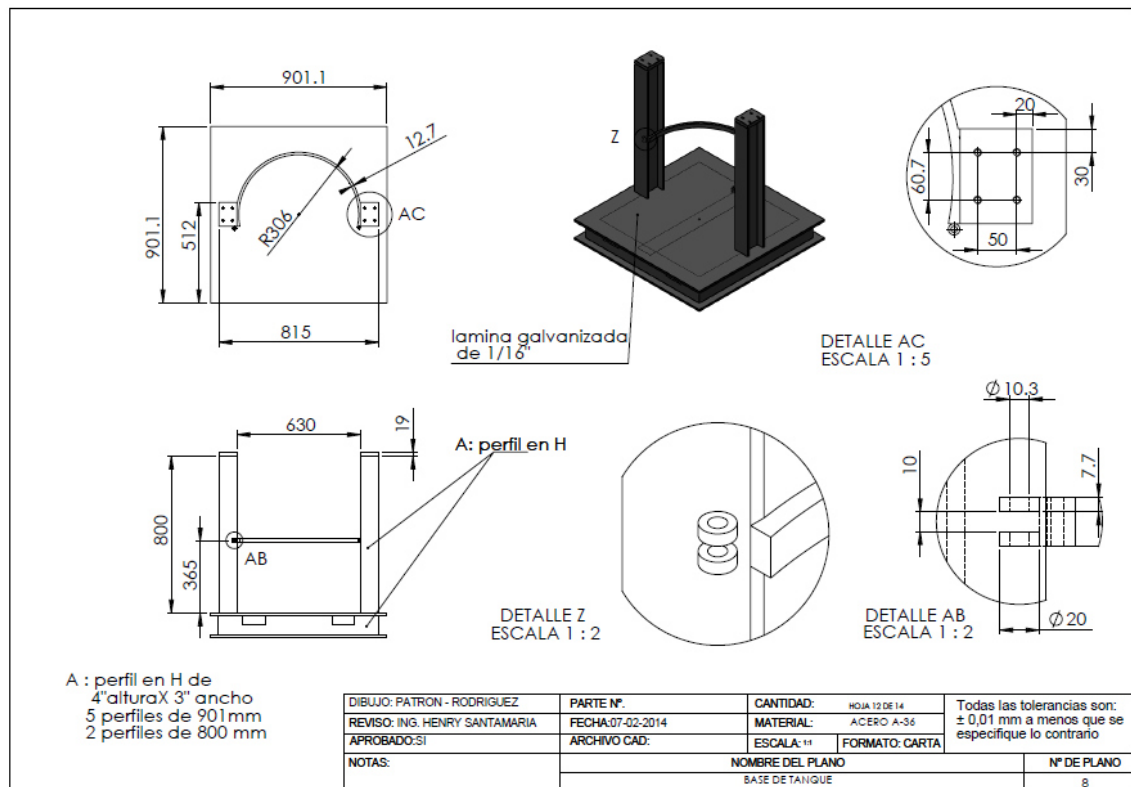
En estos planos se observa las dimensiones de las aspas junto a los detalles relevantes en ella como lo es el ajuste en la punta para evitar deslizamientos indeseados.

Plano 4



Se observa un plano de la tapa del bioreactor, se nota las dimensiones de esta y los detalles que diseñados como la otra parte del sistema de ajuste de la misma.

Plano 5



Este es un plano de la base o bastidor que soportada el bioreactor junto a su motor, como se observa es bastante sencillo, un ejemplo de ellos se evidencia el detalle del simple pero efectivo sistema de seguridad para evitar los movimientos indeseados.



7. PRESUPUESTO

Teniendo en cuenta que este proyecto solo se basa en el diseño del bioreactor mas no en su construcción, el presupuesto se realizó teniendo en cuenta solo los aspectos principales que conlleva la realización de un diseño, es decir, excluyendo su materialización y es por eso que en este presupuesto no se tienen en cuenta costos de materiales y procesos de fabricación.

PRESUPUESTO GLOBAL		
ACTIVIDAD	VALOR	TOTAL
PERSONAL CIENTIFICO	Asesores \$ 41.985/Hora; dedicación: 4 horas Semanales por 8 meses.	\$ 5.374.080
	Estudiantes \$ 21.985/Hora; dedicación: 6 horas Semanales por 8 meses.	\$ 4.221.120
TRABAJO DE CAMPO	\$ 100.000	\$ 100.000
BIBLIOGRAFIA	\$ 50.000	\$ 50.000
TOTAL	\$ 1.150.000	\$ 9.745.200



8. CRONOGRAMA PARA LA EJECUCION DE LA METODOLOGIA

Para la realización de este cronograma se tuvo en cuenta el tiempo necesario para recopilar la información técnica necesaria para seleccionar los parámetros más idóneos para el óptimo diseño del bioreactor teniendo en cuenta el proceso en particular para el cual se diseñaría.

ACTIVIDAD	MES 1	MES 2	MES 3	MES 4	MES 5	MES 6	MES 7	MES 8
	Revisión de literatura							
Lluvia de ideas								
Diseño del bioreactor								
Construcción CAD del bioreactor								
Construcción de planos del bioreactor								
Realización de documento referente al diseño del bioreactor.								



9. CONCLUSIONES

El proyecto ha contribuido para identificar y resaltar los puntos que hay que cubrir y considerar para llevar a cabo una implementación exitosa de un sistema de producción de bioetanol como los son las especificaciones técnicas y condiciones del proceso, además de eso dicho proyecto muestra las ventajas tanto económicas como a nivel de proceso al diseñar un bioreactor sencillo pero eficaz para la producción de bioetanol. Durante el diseño existieron factores importantes a tener en cuenta, como lo son la simplicidad del dispositivo, la facilidad comercial de los materiales y componentes del bioreactor, los cálculos de potencia y dimensionamiento del sistema de agitación; el cual se diseñó siguiendo los estándares de la construcción de reactores pero también teniendo en cuenta los criterios específicos que requiere el proceso que se llevara a cabo en el interior del bioreactor. Dentro de los puntos que considero tienen más importancia dentro de un proyecto de esta naturaleza son el detectar cuáles son:

- Las necesidades reales del proceso que se va a realizar, que las características del diseño se apeguen a la realidad del trabajo requerido y especificaciones técnicas de funcionalidad, mantenimiento y montaje.
- Como se mencionó a lo largo de este proyecto uno de los problemas más frecuentes para que un diseño cumpla con los objetivos es que este diseño sea el más adecuado y que la selección de las características principales sea óptima tales como materiales, sistema interno, funcionamiento y estética.
- Este proceso de selección se realizó bajo unos criterios de funcionalidad, mantenimiento y estética y así se aseguró que la alternativa escogida fuera la correcta ya que cumple con criterios primordiales para este proyecto como lo son la simplicidad en su construcción ya que se aseguró que su realización fuera con materiales totalmente comerciales y de fácil acceso, se logró una baja potencia del motor facilitando la



selección del mismo y por último se diseñó un dispositivo totalmente desmontable.

- La potencia requerida o necesaria para el sistema de agitación es de 109 Watts o 0.14 Hp.
- Las revoluciones por minuto necesarias para mantener la homegenidad de la materia debe ser de 120 rpm o 2 r/s
- Las medidas que se ajustan al diseño son de:

$$Dt = 609,52 \text{ mm}$$

$$Da = 1/3 Dt = 203,17 \text{ mm}$$

$$E = 1/3 Dt = 203,17 \text{ mm}$$

$$H = 601,59 \text{ mm}$$

$$J = 1/12 Dt = 50,79 \text{ mm}$$

$$W = 1/5 Da = 40,63 \text{ mm}$$

$$L = 1/4 Da = 50,79 \text{ mm}$$

- El motor seleccionado es el servomotor HF-SE102BJW1-S100 de Mitsubishi, debido a que es un motor al cual se le puede controlar su velocidad de funcionamiento y posición, con esto podemos garantizar el control de la posición, dirección y velocidad de mezclado en el bioreactor.



BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, C.N., Augur, C., Favela-Torres, E., Viniegra-González, G. (2001) Induction and repression patterns of fungal tannase in solid-state and submerged cultures. *Process Biochemistry*
- Durand, A. (2003). Bioreactor design for solid fermentation. *Biochemical Engineering Journal* 13,113-125.
- Holker, U., Hofer, M., Lenz, J. (2004) Biotechnology advantages of laboratory-scale solid state fermentation. Part I. *Process Biochemistry*, 12, 24-27.
- Ibañez Diana. Morales Haddy. Diseño y simulación de un fermentador aerobio para producir etanol a partir de jarabe de glucosa usando levaduras nativas.(2011)
- Iliuta, I., Iliuta, M. C., Larachi, F. (2005). Hydrodynamics Modeling of Bioclogging in Waste Gas Treating Trickle-Bed Bioreactors. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 44 (14), 5044-5052.
- Kar, B., Banerjee, R., Bhattacharyya, B.C. (1999). Microbial production of gallic acid by modified solid state fermentation. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology* 23, 173-177.
- Laukevics, J. J., Aspite, A. F., Viesturs, H. E., Tengerdy, R. P. (1984). *Biotechnology and Bioengineering* 26, 2465-2474.
- Levenspiel, O. "Ingeniería de las reacciones químicas". Ed. Reverté, 1990.
- Levenspiel, O. "Chemical Reaction Engineering 3rd Ed". Wiley, 1998.
- McCabe, Operaciones unitarias en ingeniería química, capítulo Agitación y mezcla de líquidos, séptima edición, 2007.
- McCabe, Operaciones unitarias en ingeniería química, capítulo Agitación y mezcla de líquidos, cuarta edición, 1991.
- Mitchell, D., Lonsane, B., Durand, R., Renaud, S., Maratray, J., Desgranges, C., Crooke, P., Hong, K., Tanner, R., Malaney, G. (1992). General principles of reactor design and operation for solid substrate



- cultivation. In Rolz (Ed.), Solid substrate cultivation. Elsevier Applied Science. Amsterdam, pp. 115-139.
- Mitchell, D. A., von Meien, O. F. (1999).
 - Mathematical modeling as a tool to investigate the design and operation of the zymotis packed-bed bio-reactor for solid-state fermentation. *Biotechnology and Bioengineering* 68: 127-135.
 - Mitchell, D. A., von Meien, O. F., Krieger, N. (2003). Recent developments in modeling of solid-state fermentation: heat and mass transfer in bio-reactors. *Biochemical Engineering Journal* 137-147.
 - Pandey, A., Nigam, P., Vogel, M. (1988). Simultaneous saccharification and protein enrichment fermentation of sugar beet pulp. *Biotechnology letters* 10, 67-72.
 - Pandey, A. (1994). Solid-state fermentation. In A. Pandey (Ed.) Wiley Eastern Publisher. New Delhi, pp. 3-10.
 - Pandey, A., Azmi, W., Singh, J., Banerjee, U. C. (1999). *Biotechnology: food fermentation*. In V. K. Joshi, A. Pandey (Eds.) Educational Publishers and Distributors. New Delhi, 1, pp. 383-426.
 - PICHES MADRUGA Ramón - Tendencias energéticas mundiales – 2011
 - R. CARMONA, M. LIENQUEO, O. SALAZAR, A. GARCÍA. 2009. Bionergy II: Biological pretreatment with fungi as a tool for improvement of the enzymatic saccharification of Eucalyptus globules Labill to obtain bioethanol. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, vol. 7, Art. A77.
 - Rivera Hernández Rosario, Vega Navarro Eleazar. Diseño de un reactor químico intermitente de acero 304 de 6 litros de capacidad. *Conciencia Tecnológica*, núm. 24, 2004. Instituto Tecnológico de Aguascalientes. México
 - Sánchez Cano Julieta Evangelina - Producción de etanol a partir de basura orgánica, el programa PERSEO aplicado a México – 2010.



- Aguilar, C.N., Augur, C., Favela-Torres, E., Viniegra-González, G. (2001) Induction and repression patterns of fungal tannase in solid-state and submerged cultures. *Process Biochemistry*
- Rivera Hernández Rosario, Vega Navarro Eleazar. Diseño de un reactor químico intermitente de acero 304 de 6 litros de capacidad. *Conciencia Tecnológica*, núm. 24, 2004. Instituto Tecnológico de Aguascalientes. México
- Egmasa. consejería del medio ambiente. construcción de un bioreactor a partir de una botella de refresco
- <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=35810>
- <http://ciencia-basica-experimental.net/1er-curso/metodo.htm>
- <http://www.bdigital.unal.edu.co/2356/1/isabelcristinapazastudillo.2009.pdf>
- <http://www.redalyc.org/pdf/620/62060105.pdf>
- <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/i-142.pdf>
- http://www.inaut.unsj.edu.ar/Files/1699_04.pdf
- http://www.imecal.com/perseo/bio_desarrollo.html - 2012.
- http://www.imecal.com/perseo/perseo_planta.html (2011)

ANEXOS

A continuación proporciona toda la información técnica del equipo seleccionado:

Nomenclatura del modelo

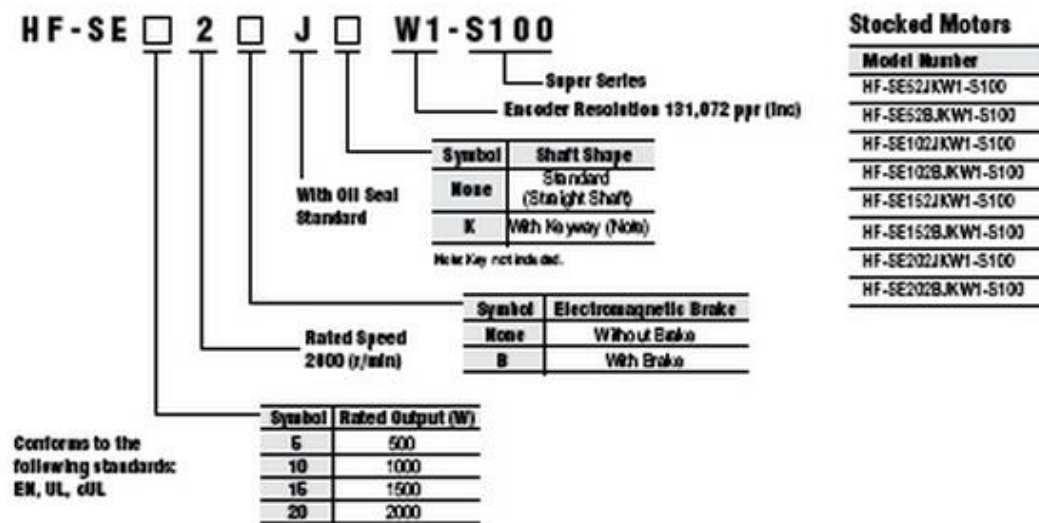


Fig. 8 nomenclatura del modelo y tipo de motor.

Tabla 2. Características generales hf-se súper serie

Serie de motor	Velocidad nominal (máx. r/min)	Capacidad de salida nominal (kW)	Freno del servomotor (B)	EN	UL, cUL	Valor nominal de protección	Características	Ejemplos de aplicación

Serie de motor	Velocidad nominal (máx. r/min)	Capacidad de salida nominal (kW)	Freno del servomotor (B)	EN	UL, cUL	Valor nominal de protección	Características	Ejemplos de aplicación
Capacidad baja	Serie HF-KE Súper 	3000 (4500)	4 tipos 0,1, 0,2, 0,4, 0,75	Sí	Sí	Sí	IP55 Excepto el conector y la parte a través del eje.	Transmisión por correa; robots; montadores; máquinas de coser; tablas X-Y; máquinas para el procesamiento de alimentos El control estable desde bajas velocidades hasta altas velocidades permite su adaptación a una amplia variedad de aplicaciones.
Capacidad media	Serie HF-SE Súper 	2000 (3000)	4 tipos 0,5, 1,0, 1,5, 2,0	Sí	Sí	Sí	IP65 Excepto la parte a través del eje	Sistemas de manipulación de materiales; robots; tablas X-Y

Tabla 3. Especificaciones Técnicas de servomotor serie MR-E HF-SE Súper



Modelo de servomotor		HF-SE52JW1-S100	HF-SE102JW1-S100	HF-SE152JW1-S100	HF-SE202JW1-S100
Modelo de servomotor con freno		HF-SE52BJW1-S100	HF-SE102BJW1-S100	HF-SE152BJW1-S100	HF-SE202BJW1-S100
Modelo de servoamplificador compatible		MR-E-70A-KH003	MR-E-100A-KH003	MR-E-200A-KH003	
Servoamplificador compatible con interfaz de entrada analógica		MR-E-70AG-KH003	MR-E-100AG-KH003	MR-E-200AG-KH003	
Capacidad de la instalación eléctrica (kVA) (*1)		1,0	1,7	2,5	3,5
Servicio en funcionamiento continuo	Potencia nominal (kW)	0,5	1,0	1,5	2,0
	Par de apriete nominal (N·m [oz·in])	2,39 (338)	4,77 (675)	7,16 (1010)	9,55 (1350)
Torque máximo (N·m [oz·pulg])		7,16 (1010)	14,3 (2020)	21,5 (3040)	28,6 (4050)
Velocidad nominal (r/min)		2000			
Velocidad máxima (r/min)		3000			
Velocidad instantánea admisible (r/min)		3450			
Potencia nominal al par de apriete nominal continuo (kW/s)		9,34	19,2	28,8	23,8
Corriente nominal (A)		2,9	5,3	8,0	10
Corriente máxima (A)		8,7	15,9	24	30
Frecuencia de frenado regenerativo (veces/min.) (*2, *3)	Sin opciones	120	62	152	71
	MR-RB032 (30 W)	180	93	-	-
	MR-RB12 (100 W)	600	310	-	-
	MR-RB30 (300 W)	-	-	456	213
	MR-RB32 (300 W)	1800	930	-	-
	MR-RB50 (500 W)	-	-	760	355
Momento de inercia J (x10-4 kg · m²) [J (oz · in²)]	Estándar	6,1 (33,4)	11,9 (65,1)	17,8 (97,3)	38,3 (209)
	Con freno electromagnético	8,3 (45,4)	14,0 (76,5)	20,0 (109)	47,9 (262)
Relación de momento de inercia del motor/carga recomendada		Momento de inercia máximo de 15 veces del servomotor (*4)			
Detector de posición/velocidad		Encoder incremental (resolución por servomotor: 131072 p/rev)			
Inserciones		Sello de aceite			
Estructura		Totalmente cerrado sin ventilación (nivel de protección: IP65) (*5)			
Entorno	Temperatura ambiente	0 a 40 °C (32 a 104 °F) (sin congelamiento), almacenamiento: -15 a 70 °C (5 a 158 °F) (sin congelamiento)			
	Humedad ambiente	80% de humedad relativa máxima (sin condensación), almacenamiento: 90% de humedad relativa máxima (sin condensación)			
	Atmósfera	Interiores (sin luz solar directa); sin gas corrosivo, gas inflamable, neblina de aceite ni polvo			
	Elevación	1000 m o menos sobre el nivel del mar			
	Vibración (*6)	X, Y: 24,5 m/s²			
Peso kg (lb)	Estándar	4,8 (11)	6,5 (15)	8,3 (19)	12 (27)
	Con freno electromagnético	6,7 (15)	8,5 (19)	11 (25)	18 (40)

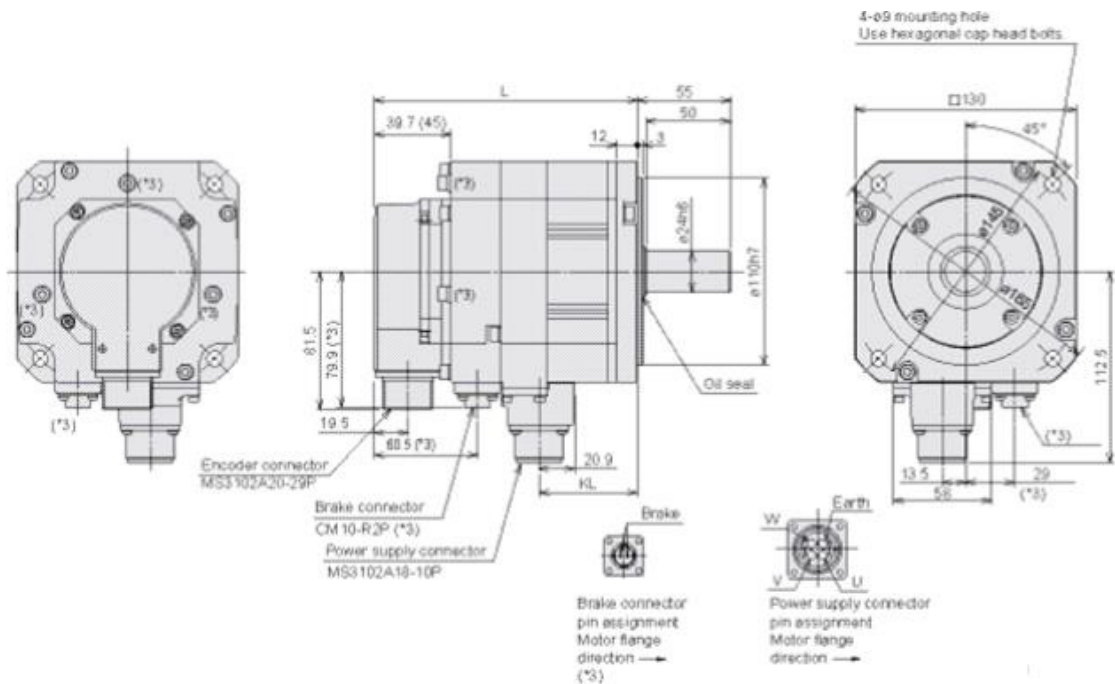


Fig. 9. Dimensiones del servomotor. Serie HF-SE Súper. HF-SE52(B)JW1-S100, HF-SE102(B)JW1-S100, HF-SE152(B)JW1-S100

Tabla 4. Dimensiones del servomotor

(Unit: mm)

Model	Variable dimensions	
	L	KL
HF-SE52(B)JW1-S100	120 (154.5)	57.8
HF-SE102(B)JW1-S100	142 (176.5)	79.8
HF-SE152(B)JW1-S100	164 (198.5)	101.8

Tabla 5. Dimensiones del eje HF-SE (B) JW1-S100

Número de modelo (*1, *2)	Dimensiones variables								
	S	R	Q	W	QK	QL	U	R	Y
HF-SE52(B)JKW1-S100 HF-SE102(B)JKW1-S100 HF-SE152(B)JKW1-S100	24h6	55	$50^{+0}_{-0.03}$	8	36	5	4	4	Profundidad de tornillo M8: 20 mm
HF-SE202(B)JKW1-S100	35	79	75	10	55	$5^{+0.2}_{-0}$	5	5	Profundidad de tornillo M8: 20 mm

El cuñero no está incluido

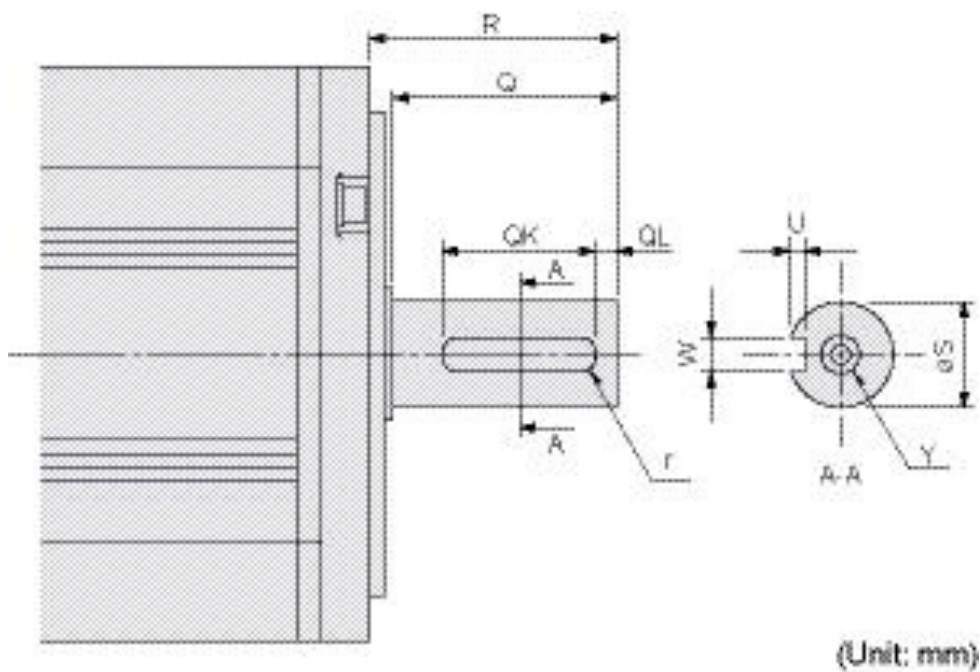


Fig. 10. Dimensión del eje