

59  
2 es.



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO DE UN REACTOR BIOLÓGICO GIRATORIO  
PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

T E S I S  
Que para obtener el título de  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA  
( Á R E A M E C Á N I C A )

P R E S E N T A

SOL FALCÓN MANJARREZ

DIRECTOR DE TESIS: M. I. JESÚS MANUEL DORADOR GONZÁLEZ



México, D. F.

Agosto, 1998

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

26 51 78



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DISEÑO DE UN REACTOR BIOLÓGICO  
GIRATORIO PARA EL TRATAMIENTO  
DE AGUAS RESIDUALES

# AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Nacional Autónoma de México por estos diez años de excelente formación académica, espacios abiertos a la cultura y el deporte, descuentos, estímulos, instalaciones y el orgullo de ser alumna de esta gran Universidad.
- A la Facultad de Ingeniería por darme la oportunidad de tener a los mejores profesores, que junto con sus instalaciones, me han hecho profesionista con todo lo que esto implica.
- Al Centro de Diseño y Manufactura por la confianza que tuvieron en mí desde el principio, por todo apoyo que recibí durante el tiempo que colaboré con ustedes y por haberme propuesto los temas para desarrollar mi servicio social y trabajo de tesis.
- Al Programa Universitario del Medio Ambiente por el apoyo económico que recibí durante la elaboración del proyecto.
- Al M. I. Jesús Manuel Dorador González por toda la confianza, el tiempo y el apoyo que me brindaste como tutor de mi carrera.
- Al Dr. Simón González por sus oportunos comentarios y todos los dulces que me robé de su oficina.
- Al Dr. Ricardo Chicurel Uziel por las horas de asesoría para ayudarme a *desenredar* el análisis estructural de este proyecto.
- Al Dr. Baltasar Mena Iniesta porque a pesar de los innumerables desacuerdos que tuvimos respecto a este proyecto tus comentarios fueron de gran utilidad.
- Al Dr. Luis Ferrer Argote por haberme dedicado el tiempo suficiente para explicarme la "Teoría de los Elefantes".
- Al Dr. Jorge Carrera Bolaños por tu infinita paciencia.
- Al Ing. Adán Magaña Ramírez por tus constantes intervenciones, por todas las ideas que aportaste, por ayudarme con el análisis y los cálculos del proyecto y por todo el tiempo que dedicaste para supervisar e imprimir este trabajo.

**A ti mamá,**

*porque diste tu vida para formar la mía y me pusiste alas para dejarme volar,  
porque a ti te debo lo que soy.*

**A mi padre,**

*porque aunque lejos, me dejaste tus consejos, tu ejemplo y tu recuerdo...*

**A mis hermanos,**

*Chavín, Pepe, Carla y Mayra, por su cariño.*

**A mis abuelos,**

*Josefa y Beto, por el amor incondicional que siempre encontré en ustedes.*

**A mis tíos,**

*Nidia, Botba y Sonia, por su confianza.*

**A Pepe,**

*por mi infancia, por tu comprensión, por ser mi papá, por todo.*

**A Adán,**

*porque juntos hemos recorrido este camino y has estado conmigo siempre que te he necesitado...  
gracias amor...*

**A mis compañeros,**

*Lorena, Elías, Paquito, Luis, Pablo, Toñito, Mary, Gustavo, Alejandro y Carlos,  
por su apoyo incondicional en todo momento.*

**A la Universidad Nacional Autónoma de México,**

*por darme esta oportunidad.*

**A todos mis profesores,**

*por su tiempo, por su dedicación, por todo lo que me enseñaron.*

**A Jesús Manuel,**

*por la confianza que depositaste en mí, y por todo el apoyo que me brindaste...gracias.*

**A todos los familiares y amigos,**

*que me apoyaron y ayudaron para llegara hasta aquí.*

## RESUMEN

Al hombre le bastan 3 litros de agua al día para sobrevivir; no obstante, en algunas ciudades se llegan a consumir 2000 litros/habitante/día. Todo indica que entre más esfuerzos se hacen para abastecer de agua potable a las ciudades, más de ésta se desperdicia, por lo que la dificultad de suministro se combina con problemas de desalojo. Para solucionarlo se han desarrollado una gran variedad de sistemas para la purificación de las aguas de desecho.

En general, el tratamiento de aguas residuales se realiza en tres etapas: primaria, secundaria o biológica y terciaria; el tratamiento biológico se emplea para degradar la materia orgánica que contamina el agua por medio de microorganismos que utilizan los desechos orgánicos como una fuente de nutrientes.

Este proceso se realiza en reactores biológicos que pueden estar fijos o en movimiento. En este último caso, una población mixta de microorganismos forman una película, comúnmente llamada biomasa, que se adhiere a la superficie de un medio sólido, el cual gira dentro de un tanque por el que fluyen las aguas residuales. La eficiencia de purificación de estos equipos depende de la cantidad de microorganismos activos que se puedan alojar en el sistema.

El medio de soporte en el que se desarrolla la biomasa se puede obtener con diversas configuraciones, la más común consiste en una serie de discos montados sobre un eje; sin embargo, este sistema ha presentado diversos problemas estructurales, además de que el costo de manufactura de los discos es muy elevado.

En este trabajo se presenta el diseño de un reactor biológico giratorio que sustituye a los biodiscos, aumentando la densidad de área de contacto y disminuyendo los costos de fabricación.

Se analizan los reactores biológicos existentes en el mercado internacional, se proponen diversos medios de soporte para sustituir a los discos convencionales y, finalmente, se presenta el diseño estructural del sistema.

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
<b>I ANTECEDENTES</b>	
1.1 Administración de los recursos del agua	5
1.2 Contaminación del agua	7
1.3 Criterios para la selección de un tratamiento	11
1.4 Clasificación de los tipos de tratamiento	12
1.5 Características de los sistemas de película biológica	15
1.6 Reactores biológicos fijos	17
1.7 Reactores biológicos giratorios	21
1.8 Inconvenientes del diseño actual	29
1.9 Especificaciones de diseño	30
1.10 Metodología utilizada en el diseño	31
<b>II DEFINICIÓN DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO</b>	
2.1 Parámetros para calcular la superficie de contacto	33
2.2 Propuestas para sustituir a los biodiscos	34
2.3 Selección del medio de soporte	44
2.4 Resultados del modelo experimental	47
2.5 Inclinación del sistema y geometría del medio de soporte	49
<b>III DISEÑO ESTRUCTURAL</b>	
3.1 Diseño conceptual	57
3.2 Ensamblador	64
3.3 Análisis de cargas en el medio de soporte	65
3.4 Análisis de cargas en la estructura	71
3.5 Generalidades	81
CONCLUSIONES	83
BIBLIOGRAFÍA	85

# *Introducción*

Tres cuartas partes del planeta que habitamos están cubiertas por agua y los estudios hidrológicos parecen confirmar que en la corteza terrestre existen mantos acuíferos de volumen considerable; no obstante, los recursos de agua de que dispone la humanidad no son ilimitados. Los múltiples usos a que se designa el agua, la creciente demanda y las pérdidas ocasionadas por fugas en tuberías y desperdicios por parte de los usuarios la han convertido en un recurso escaso.

Es un hecho que el hombre necesita el agua para su supervivencia; por eso, las civilizaciones primitivas se desarrollaron bajo la condición dominante del agua disponible, lo que fundamentalmente determinó su ubicación geográfica. Así, desde los inicios de la humanidad, el hombre ha tomado de la naturaleza el agua que necesita, la ha usado y, de igual forma, la ha desalojado en ríos, lagos y mares, hasta el punto de convertir muchos de sus recursos acuíferos en inutilizables.

Históricamente, el desalojo de las aguas residuales no ha causado preocupación en la sociedad en general y se suponía que el medio ambiente las absorbía y les daba un "tratamiento natural". No obstante, el progreso cultural e industrial acabó llevando esta práctica al límite. Así, en todos los países han surgido leyes de protección que limitan el grado de contaminación en las aguas de desecho, tanto domésticas como industriales.

Existen diversas operaciones unitarias para el tratamiento de aguas residuales, el grado de tratamiento requerido para un agua de desecho depende fundamentalmente de las normas de calidad que debe cumplir para ser descargada en cauces abiertos y del uso a que se destinará ésta; sin embargo, todos los procesos tienen el objetivo de eliminar impurezas y sustancias tóxicas.

El tratamiento de aguas residuales se realiza en tres etapas: primaria, secundaria o biológica y terciaria o avanzada. El tratamiento primario se emplea para la eliminación de los sólidos en suspensión y los materiales flotantes; el biológico, para oxidar la materia orgánica por medio de microorganismos; y el terciario, para disminuir los contaminantes que no se eliminan con los tratamientos biológicos convencionales.

Se han patentado una gran cantidad de sistemas de tratamiento biológico para la purificación de aguas residuales, los cuales hacen uso de una población mixta de microorganismos capaz de descomponer la materia orgánica que contamina el agua para utilizarla como una fuente de nutrientes. Con el desarrollo de la ingeniería y la microbiología, se ha intensificado y acelerado este mecanismo para la purificación a gran escala de las aguas residuales.



La purificación se logra en reactores biológicos, poniendo en contacto dichas aguas con una población microbiana mixta, en forma de una película que se adhiere a la superficie de un medio sólido de soporte, el cual puede estar fijo o en movimiento. En el primero, el agua residual pasa sobre el medio estacionario y en el segundo caso, el medio se mueve a través del líquido.

A los sistemas que utilizan un medio en movimiento se les llama reactores biológicos giratorios, RBC (Rotating Biological Contactors). En ellos, una película de lama microbiana se acumula sobre un medio de soporte parcialmente sumergido que gira lentamente sobre un eje horizontal, dentro de un tanque, a través del cual fluyen las aguas residuales. La película de lama se ve así, expuesta sucesivamente a los nutrientes en las aguas residuales y al aire, según gira el sistema.

En el proceso se produce un exceso de biomasa, que se desprende de la biopelícula por diversos mecanismos, entre otros por la acción de fuerzas cortantes que se producen en la biomasa al contacto con el agua. Por otra lado, el movimiento del material de soporte ocasiona ciertas condiciones de mezcla, que mantienen en suspensión dicha biomasa. El agua residual tratada de esta forma se transfiere a un clarificador donde se produce la sedimentación y extracción de la biomasa en exceso. Normalmente el agua a tratar atraviesa más de un reactor, llegándose a montar hasta cuatro unidades en serie, antes de la decantación.

El medio de soporte para los reactores en movimiento se puede obtener con diversas configuraciones, como discos (biodiscos), o un recipiente de rejilla de alambre con un medio plástico aleatorio (biocilindros). La configuración comúnmente utilizada es la de los biodiscos.

Una de las ventajas de los sistemas giratorios es la eficiencia de purificación debida a la densidad de la biomasa que se puede mantener sobre la superficie del medio de soporte, ya que con sólo con el 10% de terreno que requiere un reactor biológico fijo se puede purificar la misma cantidad de agua residual, por lo que se prefieren cuando existen limitaciones de terreno. Así, el sistema se utiliza para el tratamiento de aguas residuales de pequeñas comunidades, pero se amplía cada vez más en el tratamiento de desechos industriales.

En la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria ha funcionado un sistema de biodiscos por más de 10 años, este equipo fue diseñado en la UNAM con la finalidad de contar con tecnología nacional; sin embargo, se han presentado diversos problemas que impiden el correcto funcionamiento del equipo. Estos problemas son básicamente de resistencia de materiales y corrosión.

Se ha observado que cuando las bacterias crecen forman "cadenas", si éstas llegan a ser muy largas, obstruyen el espacio existente entre los discos impidiendo que el agua y el oxígeno lleguen a las regiones internas del sistema, por lo que el área efectiva de trabajo disminuye sensiblemente. En el peor de los casos, los microorganismos que habitan en estas zonas mueren y provocan el desprendimiento

de la biopelícula. Además, en las noches invernales, cuando la temperatura baja, las cadenas de microorganismos se endurecen e impiden la movilidad de los discos, por lo que éstos se colapsan ocasionando esfuerzos muy grandes en el eje. Sustituir un disco fracturado implica desmontar todos los que lo anteceden, por lo que es necesario detener el proceso de purificación y vaciar el tanque.

El vaciado del tanque también se realiza para efectos de limpieza, y al hacerlo, se pierde la fuerza de flotación en el sistema y en algunas ocasiones el eje falla.

Otro de los grandes problemas es el alto costo de manufactura de los discos debido a que solamente existe una empresa en México que produce el plástico laminado del tamaño requerido para las placas de los biodiscos. Para solucionar este problema, los discos se fabricaron en secciones circulares, pero aún así, los costos no disminuyeron sensiblemente.

Después de recopilar datos sobre las ventajas y desventajas de este equipo, el Programa Universitario del Medio Ambiente de la UNAM (PUMA) solicitó al Centro de Diseño y Manufactura de la Facultad de Ingeniería (CDM) el diseño de un nuevo reactor biológico giratorio modular para el tratamiento de aguas residuales que sustituyera a los biodiscos, capaz de adaptarse tanto a las necesidades de pequeñas poblaciones, como al tratamiento de desechos industriales a gran escala.

Además, este nuevo sistema debe sustituir a los discos corrugados por otro medio de soporte más económico que ofrezca una mayor superficie de contacto en el mismo volumen de trabajo, y resolver los problemas de resistencia de materiales y corrosión a través de un diseño estructural más riguroso.

El nuevo diseño debe también ser competitivo internacionalmente, es decir, debe tratar las aguas de desecho con igual o mayor eficiencia que los sistemas comerciales a un menor costo.

Así, en este trabajo se presenta el diseño de este nuevo reactor biológico giratorio; sin embargo, sólo se reportan los aspectos de diseño mecánico. El objetivo es proporcionar un medio de soporte a la biopelícula de menor costo que los biodiscos y una estructura resistente al medio, sin analizar la eficiencia biológica de purificación ni las características de los microorganismos necesarios para la depuración.

Para analizar lo anterior, al término de este trabajo se fabricará un prototipo experimental que se instalará en la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria, y durante seis meses, se le realizarán las pruebas necesarias para verificar que su funcionamiento sea el previsto. Posteriormente se harán los ajustes necesarios para patentar la tecnología.

Este trabajo se encuentra estructurado de la siguiente manera:

Para diseñar el medio de soporte del reactor, primero se analizaron las configuraciones de la superficie de contacto de los equipos disponibles en el mercado internacional, este análisis se encuentra en el capítulo I.

En la primera parte de dicho capítulo se presenta la administración de los recursos de agua, su contaminación y los parámetros que se usan para definir su calidad, porque éstos se utilizan en el control de los procesos de depuración y definen el proceso de tratamiento adecuado. Posteriormente, se describen los criterios de selección de un tratamiento y se da una clasificación de los mismos.

En la segunda parte del capítulo, se dan las características de los reactores biológicos, explicando brevemente el mecanismo de formación de la biopelícula y los requerimientos de la superficie de contacto para su mejor funcionamiento. Finalmente, se analizan las características de operación y los medios de soporte utilizados en los reactores biológicos fijos y giratorios, incluyendo en estos últimos las configuraciones típicas de biodiscos y biocilindros. La razón por la cual se incluye el análisis de los reactores fijos tiene que ver con la gran analogía de los medios de soporte utilizados para estos sistemas con los usados en los reactores giratorios, ya que, al parecer, el desarrollo de estos últimos se basó en los resultados obtenidos, en cuanto a peso y eficiencia de purificación, de los reactores fijos.

En el segundo capítulo se presenta el diseño de la superficie de contacto del reactor biológico que se propone. Para superar la densidad de área superficial de los biodiscos, se generaron alrededor de 50 alternativas para el medio de soporte, las cuales se evaluaron y compararon cualitativa y cuantitativamente respecto a la configuración de discos planos. Posteriormente, a través de diversos criterios de selección, se escogió la opción que más se acercaba a los propósitos especificados.

Se observó que para tener mejores resultados con esta configuración era necesario darle al sistema un ángulo de inclinación, por lo que se construyó un modelo experimental. En este modelo se estudió el comportamiento del agua en el sistema con diferentes ángulos de inclinación. En la última parte de este capítulo se presentan estos resultados y la forma como se determinó este ángulo. También, se proponen algunas modificaciones a la configuración seleccionada para optimizar el área de contacto.

En el capítulo III, se expone el proceso de ensamble del medio de soporte; el diseño conceptual del sistema, que consiste en determinar las características de la estructura que soportará la superficie de contacto; y el diseño de detalle, donde se presenta la manera como se analizaron las cargas y esfuerzos a los que están sometidas las piezas que conforman al sistema, así como los materiales y los procesos de fabricación y ensamble propuestos.

Finalmente, en las conclusiones, se discuten las ventajas y desventajas de este diseño respecto a los equipos comerciales, y los problemas que se resolvieron durante el desarrollo de este trabajo, esperando que esto sea de utilidad para la continuación del proyecto.

# *I Antecedentes*

## 1.1 ADMINISTRACIÓN DE LOS RECURSOS DE AGUA

En la Tierra hay más de mil millones de kilómetros cúbicos de agua. Distribuida uniformemente sobre la superficie de nuestro planeta, formaría una capa de casi tres mil metros de espesor; sin embargo, se da la paradoja de que el agua siendo muy abundante, es para el hombre un bien escaso, ya que el agua potable sólo representa una pequeña parte de las reservas disponibles en el planeta, 24 millones de km<sup>3</sup>; el resto es inaccesible o está constituido por las aguas saladas del mar.

Para sobrevivir, al hombre le basta con 3 litros de agua al día; con 40 litros, puede vivir en condiciones de comodidad e higiene muy aceptables. Ahora bien, en las grandes ciudades europeas se consumen de 300 a 400 litros por habitante al día, el 25-30% de los cuales están destinados al consumo industrial, y en algunas ciudades de Estados Unidos puede alcanzar 2000 litros/habitante/día. El rápido aumento del consumo global de las ciudades (alrededor del 3% por año) puede explicarse por el crecimiento urbano, el mejoramiento del nivel de vida y el desarrollo industrial.

La distribución de agua disponible en el planeta no es uniforme, existiendo países totalmente áridos, semiáridos y húmedos. En los dos primeros el problema de los recursos es evidente; en los países húmedos, en los que naturalmente la escasez de agua no es un problema, está ocurriendo que la falta de cuidado por parte de los usuarios con las descargas de sus aguas residuales deteriora la calidad de los cursos y masas de agua hasta tal punto que la convierten en inutilizable tanto para los seres que viven en ella, como para aquellos que viven de ella. Lo cual da como consecuencia que la cuestión de la administración de acuíferos se haya convertido en un problema general.

Debido a que la Naturaleza no sitúa el agua de la calidad requerida en el lugar que se precisa, en la cuantía que se necesita y en el momento que conviene, el hombre, en la medida que el desarrollo técnico se lo ha permitido, ha buscado el agua donde existe, ha ampliado las zonas de utilización mediante conducciones y ha creado diques y embalses para su almacenamiento. Sin embargo, hasta hace apenas unas décadas no se había preocupado por la contaminación del medio ambiente ocasionado por el desecho de sus aguas residuales.

Contaminada por el petróleo, el plomo, el mercurio, el cadmio y por todos los productos residuales de la industria, el agua podría convertirse en una calamidad.

"Hemos tardado veinte siglos para llevar el agua al grifo y en veinte años la hemos hecho imbebible".<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Josa, *"Los recursos de agua y la lucha contra la contaminación"*, 1973.

La amenaza de una gran escasez (improbable si se tiene en cuenta que el 1% del agua de los mares sería suficiente para preservar las necesidades de la humanidad durante mil años) y, sobre todo, la destrucción de la red hidrológica hacen pensar en dos soluciones: Detener la muerte lenta del agua por contaminación, y explotar nuevos recursos de agua.

Para lograr lo anterior, es necesario planificar adecuadamente los recursos de agua disponible de un país, previendo las necesidades de su población y la adecuada evacuación de sus aguas residuales.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) en el número 404 de su serie de Informes Técnicos, publicado en 1968, dice textualmente:

"Si se quiere organizar regionalmente la administración del agua disponible en un país, hay que comenzar por hacer un inventario de los recursos existentes de aguas superficiales, subterráneas y meteorológicas... La medida siguiente será prever las necesidades futuras de agua para todos los usos; en primer lugar los urbanos, industriales y agrícolas y, después, los recreativos, producción de energía, navegación, arrastre de desperdicios y otras finalidades. En la medida de lo posible, todas estas necesidades deben satisfacerse con los recursos del país de que se trate. Si la distribución estacional del agua es poco favorable, es necesario prever el embalse en los períodos de abundancia para satisfacer las necesidades en los períodos de sequía. Si los recursos conocidos son insuficientes, será necesario encontrar nuevos recursos o transportar el agua de otras regiones que tengan excedente... En los planes nacionales y regionales de desarrollo económico y social debe figurar siempre la planificación relativa a los recursos del agua; sin embargo, la planificación urbana, el abastecimiento de agua, el alcantarillado y los desagües se estudian con frecuencia después de haber terminado el plan general. Este procedimiento es antieconómico y puede plantear más adelante problemas serios, tanto en relación con la administración general del agua disponible, como con el abastecimiento para fines urbanos e industriales. Por esta razón el abastecimiento de aguas y la evacuación de aguas residuales debe ser parte integrante de la planificación física y económica; así, es importante que el servicio de abastecimiento de agua, alcantarillado y desagüe dependa de un solo organismo de carácter regional..."<sup>2</sup>

Desgraciadamente, nuestro país es un claro ejemplo de la falta de administración urbana y del abastecimiento y desalojo de nuestras aguas. El rápido aumento de la población en las ciudades, debido a la emigración de personas que llegan a éstas buscando mejores condiciones de vida, provoca mayor demanda de agua potable y por tanto, mayor volumen de aguas residuales que deben ser desalojadas.

---

<sup>2</sup> Josa, *"Los recursos de agua y la lucha contra la contaminación"*, 1973, pp. 4-6

Para satisfacer la demanda, desde 1936 se han perforado, en la ciudad de México, 1341 pozos con un caudal promedio de 40 m<sup>3</sup>/s y se han agotado varios manantiales; sin embargo, el suministro de agua potable sigue siendo insuficiente, y en cambio hemos provocado, en tan sólo un siglo, más de 9 m de hundimiento. Actualmente se trae el agua de lugares cada vez más lejanos y a un mayor costo, y al mismo tiempo, las aguas residuales se depositan en lugares muy cercanos a las tomas de agua potable, convirtiendo grandes fuentes de abastecimiento en fuentes de aguas negras. En 1956 se tomó la decisión de tratar las aguas residuales y reutilizarlas para el riego de áreas verdes y llenado de lagos. Así fue como nació la primera planta de tratamiento de aguas residuales ubicada en Chapultepec.

Sin embargo, todo indica que entre más esfuerzos se hacen para abastecer de agua potable a la mayoría de la ciudad, más agua se desperdicia, creando un volumen mayor de aguas residuales; por lo que un problema de suministro se convierte en un problema de desalojo.

Pero hay tres factores que tienden a limitar este crecimiento: las técnicas aportadas a las redes de distribución para reducir los escapes, el aumento en las tarifas de consumo, que disminuyen el desperdicio de agua, y el desarrollo de los tratamientos de aguas residuales, sobre todo en la industria.

## 1.2 CONTAMINACIÓN DEL AGUA

La contaminación de las aguas es por definición el efecto producido por acciones exteriores en el sentido de empeorar la calidad del agua. El agua natural puede contener una gran variedad de impurezas, características del ciclo hidrológico que ha experimentado previamente, cuando estas impurezas representan elementos nocivos para el uso a que va destinada el agua se les denomina contaminantes. Por lo tanto, es el grado de calidad requerido el que determina si una impureza es contaminante o no. Así, el agua se puede destinar a usos urbanos, industriales, agrícolas, ganaderos, producción de energía, transporte de desperdicios e incluso el ocio.

Las aguas naturales siempre contienen impurezas, a pesar de que provengan de agua de lluvia teóricamente pura; su composición química está variando constantemente como consecuencia de tres clases diferentes de acciones: naturales, biológicas y sociales.

"Las acciones naturales provienen de agentes tales como la dilución que producen los aguaceros, la turbiedad debida a los arrastres que estos mismos aportan, el incremento de nutrientes que arrastran las escorrentías principalmente en las zonas de bosques de hojas caducas y la consiguiente eutroficación o aumento de la productividad biológica, que produce el incremento de nutrientes; otras veces la solubilidad de los minerales que constituyen el terreno de la cuenca vertiente

aporta elementos nutritivos, como el caso de las potasas o fosfatos, y en casos más raros puede aportar también minerales tóxicos".<sup>3</sup>

Las contaminación biológica que produce el hombre es la más antigua: en todo proceso vital, el hombre toma agua para su alimentación, para su aseo y para la limpieza de sus enseres y la devuelve sucia.

La contaminación de las aguas por acción directa del hombre se debe en primer lugar a las concentraciones masivas de las aglomeraciones humanas y, por otro lado, al mayor empleo del agua para mejorar sus condiciones de vida. Desde que se inició la industrialización, a fines del siglo XVII, la industria ha ido deshaciéndose de sus desechos a través de los cauces públicos, que con sus corrientes los alejan de la propia industria. La gama de contaminación de las aguas industriales varía desde la descarga de grandes volúmenes de agua de refrigeración; cuya contaminación es el calor, hasta la pequeñas y discontinuas, pero concentradísimas descargas, procedentes de la industria química, de los tintes, etc.

Así, los lagos, los cursos de agua y los mares reciben desagües de todo tipo:

- ⇒ Aguas industriales; las industrias más contaminantes son las del petróleo, carbón, las químicas y las derivadas de la celulosa.
- ⇒ Aguas residuales urbanas; su volumen está en constante aumento hasta 600 litros por persona al día.
- ⇒ Contaminantes de origen agrícola; debidas a algunos productos que se utilizan en grandes cantidades, como los insecticidas y los abonos orgánicos o químicos.
- ⇒ Contaminantes térmicos; debidas sobre todo a la producción de aguas calientes por fábricas y centrales térmicas, que contribuyen a la muerte lenta de los animales que forman la fauna acuática.
- ⇒ Aguas pluviales; en zonas urbanizadas también pueden tener efectos contaminantes significativos.

Los contaminantes del agua se clasifican en tres categorías: químicos, físicos y biológicos.

Los contaminantes químicos comprenden tanto productos químicos orgánicos como inorgánicos. El resultado de la contaminación por compuestos orgánicos es la disminución de oxígeno como resultado de la utilización del existente en el proceso de degradación de dichos compuestos. Cuando la concentración de sustancias contaminantes en el agua aumenta mucho, ésta última se degrada y pierde el oxígeno que lleva disuelto. En estas condiciones, los peces mueren por asfixia y también las bacterias aerobias (aquéllas que necesitan aire para vivir), que mineralizan los desechos orgánicos contenidos en el agua, por lo que aseguran la autodepuración de

---

<sup>3</sup> Josa, "Los recursos de agua y la lucha contra la contaminación", 1973, p. 10

ésta. En su lugar se desarrollan las bacterias anaerobias, que no necesitan aire para vivir, pero que ayudan a fermentar los desechos orgánicos, creándose así un medio inadecuado a la vida de los organismos superiores.

Algunos contaminantes físicos incluyen:

- ⇒ cambios térmicos: es el caso de aguas procedentes de plantas industriales, relativamente calientes después de haber sido utilizadas en los intercambiadores (enfriadores).
- ⇒ color; por ejemplo, los licores negros que se descargan procedentes de las plantas de fabricación de pasta química.
- ⇒ turbidez; originada por la descarga de aguas que contienen sólidos en suspensión.
- ⇒ espumas; algunos detergentes constituyen una causa importante de formación de espumas.
- ⇒ radioactividad.

Los contaminantes biológicos son los responsables de la transmisión de enfermedades en las aguas de abastecimiento, como el cólera, la tifoidea y la paratifoidea, entre otras. Así, la contaminación no sólo destruye el equilibrio natural de las aguas, sino que pone también en peligro la salud y vida humanas, mediante los efectos tóxicos que tienen muchos agentes contaminantes presentes en el agua.

Aunque la contaminación es un problema serio y es conveniente que todos estemos conscientes de eso, no es justificable el argumento de la autodestrucción que han manejado en los últimos años ecologistas y "protectores del medio ambiente", concluyendo que la humanidad terminará destruyendo el planeta, a través de procesos sistemáticos de contaminación del medio ambiente, con el fin de conseguir un progreso material.

Según Ramalho: "El instinto de conservación de las especies es una motivación básica para la humanidad, y el hombre está equipado para corregir el deterioro del medio ambiente antes de que sea demasiado tarde. De hecho, la corrección de la contaminación no es un problema técnico de gran dificultad comparado con otros, mucho más complejos, resueltos con éxito en este siglo, tal como la exploración de la luna por el hombre. Esencialmente, el conocimiento técnico básico requerido para resolver el problema de la contaminación está ya a disposición del hombre y, en la medida en que quiera pagar un precio razonable por conseguirlo, la pesadilla de la destrucción a través de la contaminación nunca se hará realidad. De hecho precios muy superiores han sido pagados por la humanidad para desarrollar y mantener toda la maquinaria de guerra y armamento." <sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Ramalho, "Tratamientos de aguas residuales", 1993, p. 1



### Parámetros de calidad de las aguas

Antes de mencionar los procesos disponibles para mejorar la calidad de las aguas, es conveniente revisar los parámetros utilizados para definir su calidad; estos parámetros se utilizan en el control de los procesos de depuración para determinar el tratamiento adecuado. Los parámetros se pueden clasificar en cuatro grandes grupos: físicos, químicos, biológicos y radioactivos.<sup>5</sup>

#### ⇒ Parámetros físicos:

- Sabor y olor; tienen un interés evidente en las aguas potables destinadas al consumo humano.
- Color; ciertos colores en aguas naturales son indicativos de la presencia de ciertos contaminantes.
- Turbidez; es la dificultad del agua para transmitir luz debido a materiales insolubles en suspensión, coloidales o muy finos. Son difíciles de decantar y filtrar, y pueden dar lugar a la formación de depósitos en los conductos de agua, equipos de proceso, etc.
- Conductividad y resistividad eléctrica; la primera es indicativa de la materia ionizable total presente en el agua, el agua pura contribuye mínimamente a la conductividad.

⇒ Parámetros químicos: pH, dureza, alcalinidad, acidez mineral, coloides, sólidos disueltos, sólidos en suspensión, residuo seco, cloruros, sulfatos, nitratos, fosfatos, fluoruros, sílice, bicarbonatos, carbonatos, componentes iónicos, sodio, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, metales tóxicos, gases disueltos, etc.

#### ⇒ Parámetros biológicos:

- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>); mide la cantidad de oxígeno consumido en la eliminación de la materia orgánica del agua, mediante procesos biológicos aerobios.
- Demanda química de oxígeno (DQO); Indica el contenido de materias orgánicas oxidables y otras sustancias reductoras en el agua.
- Carbón orgánico total; indica el contenido de materia orgánica en el agua.
- Demanda de cloro; indica el contenido de materia orgánica en el agua al añadir cloro.

⇒ Parámetros radioactivos; Suelen medirse las actividades alfa y beta mediante reactores de centelleo.

---

<sup>5</sup> Información obtenida de: Rigola, "Tratamiento de aguas industriales...", 1989, pp. 27-41

### 1.3 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE UN TRATAMIENTO

No todas las aguas residuales contienen los mismos contaminantes, por lo que el tratamiento a utilizar depende, entre otros factores, del tipo de contaminación presente. Así, en un agua residual se pueden encontrar contaminantes orgánicos e inorgánicos en forma disuelta o en suspensión como:

- materia orgánica soluble, medida como DBO, DQO o COT,
- aceites, grasas y material flotante,
- nutrientes,
- sólidos en suspensión y materia coloidal,
- color, turbidez y olor,
- acidez o alcalinidad,
- metales pesados,
- contaminantes orgánicos especiales, etc.

El grado de tratamiento requerido para un agua de desecho depende fundamentalmente de los límites de vertido para el afluente y el uso a que se destinará el agua tratada; sin embargo, se toman en cuenta otros factores para la selección, como:

- caudal,
- composición,
- concentraciones,
- calidad requerida del efluente,
- abundancia del agua,
- posibilidades de reutilización,
- posibilidades de vertido a una depuradora municipal,
- tasas de vertido,
- inversión, costos de mantenimiento, rendimientos, estabilidad,
- temperatura,
- impacto ambiental,
- producción de fangos, etc.

No es conveniente tratar los vertidos industriales de la misma forma que las aguas residuales urbanas porque, con mucha frecuencia, la materia orgánica no es el contaminante clave ni está presente en los vertidos como es el caso de los residuos urbanos.

La depuración puede ser a través de dos líneas fundamentales:

- ⇒ Físico-química; se basa en operaciones físicas o reacciones químicas. El costo de los reactivos es elevado, producen mayores volúmenes de fango y requiere que los operarios estén mejor preparados, pero se prefieren cuando el terreno es costoso o limitado y cuando deben operar en climas de baja temperatura. Una de sus ventajas es que pueden entrar en operación fácil y rápidamente sin afectar su eficiencia, además el costo de inversión es bajo.
- ⇒ Biológica; se oxida la materia orgánica existente en el agua residual por medio de microorganismos, los cuales pueden ser aerobios o anaerobios. En los primeros, se consume gran cantidad de energía al introducir el aire necesario para provocar la reacción; mientras que en los segundos, no sólo se reduce el consumo energético, sino que pueden ser productores netos de energía, pero necesitan inversiones elevadas y sólo actúan de forma estable sobre algunos sustratos orgánicos naturales.

"La selección del tratamiento suele requerir ensayos previos de laboratorio o planta piloto. Los ensayos físico-químicos son de relativa rapidez, pero los biológicos pueden requerir varios meses hasta tener resultados fiables".<sup>6</sup>

#### 1.4 CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE TRATAMIENTOS

Existen diversas operaciones unitarias para el tratamiento de aguas residuales, sin embargo, todos los procesos tienen el objetivo de eliminar impurezas y sustancias tóxicas. No importa cuáles sean los sistemas adoptados y los aparatos que se empleen, para que una estación depuradora sea completa debe realizar las siguientes tres operaciones fundamentales:

- 1) Pretratamiento; su objetivo es separar los sólidos de mayor tamaño que pudiesen provocar un mal funcionamiento de los equipos electromecánicos utilizados en tratamientos posteriores.
- 2) Tratamiento de las aguas; se puede dividir en tres etapas:
  - a) Primaria. Se preparan las aguas residuales para su tratamiento biológico, eliminando ciertos contaminantes (50-70% de los sólidos sedimentables) y reduciendo las variaciones de caudal y concentraciones de las aguas que llegan a la planta. Después de esta etapa, previamente desinfectada, el agua se puede utilizar para la irrigación de cultivos y algunos procesos industriales.

---

<sup>6</sup> Rigola, "Tratamiento de aguas industriales...", 1989, p. 47

- b) Secundaria. Se realiza la depuración de las aguas residuales por medios biológicos. En la mayoría de los casos el tratamiento secundario es de tipo aerobio debido a que la descomposición es estable e inofensiva. De esta segunda etapa la depuración debe ser de, por lo menos, el 90% de la contaminación original, y cuando se efectúa una desinfección, se puede remover hasta el 85% de DBO, así como sólidos suspendidos y casi todos los organismos patógenos; sin embargo, aún quedan contaminantes como nitrógeno, fósforo, DQO soluble, metales pesados etc., que son peligrosos para el hombre y el medio ambiente, por lo que es necesario un tratamiento avanzado.
- c) Terciaria o avanzada. Sólo se usa cuando se exige una pureza extrema en las aguas vertidas. Con frecuencia consiste en una cloración cuidadosamente dosificada para no ceder a las aguas una dosis perjudicial de cloro residual.
- 3) Tratamiento de los fangos; algunos de los procesos utilizados en la depuración de las aguas producen fangos que, a su vez, requieren un proceso posterior de espesado y deshidratación, antes de su traslado a una zona final de depósito o su incineración. Los fangos son ricos en materia orgánica inerte y en amoníaco, por lo que si se mantienen exentos de compuestos clorados y se añaden proporciones convenientes de potasa y fosfatos, se puede obtener un abono aceptable en el mercado, que compense los gastos de mantenimiento de la planta depuradora.

Como se mencionó en la introducción, el objetivo de este trabajo es el diseño de un "reactor biológico giratorio", que es un sistema biológico utilizado como tratamiento secundario en la purificación de las aguas residuales, por lo que sólo se mencionarán de los procesos utilizados en cada etapa del tratamiento. Para mayor información de estos sistemas se puede consultar la bibliografía que se presenta al final del trabajo. Sin embargo, tomando en cuenta que el equipo a diseñar en este trabajo se utilizará en la segunda etapa del tratamiento de aguas, posteriormente se analizarán las características y requerimientos de algunos de los sistemas de película biológica existentes en el mercado internacional.

Es importante tener en cuenta que después de un tratamiento primario, ya se han eliminado los sólidos sedimentables y se han homogeneizado el caudal y las variaciones del agua; ya que estas características se consideran como propiedades del fluido que entra al sistema a diseñar.

A continuación se presenta una lista de las operaciones unitarias que se pueden realizar en las diferentes etapas del proceso de tratamiento de aguas residuales dependiendo del grado de contaminación de las mismas.<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup> Información obtenida de: Ramalho, "Tratamiento de aguas residuales", 1993, p. 9

*Pretratamiento*

- Cribado o desbozo
- Desarenación
- Desmenuzado
- Desengrasado
- Homogeneización
- Neutralización
- Igualación

*Tratamiento primario*

- Sedimentación primaria
- Tanques Imhoff
- Lodos primarios
- Flotación
- Separación de aceites

*Tratamiento secundario*

- Sedimentación secundaria
- Lodos activados
- Aireación prolongada (proceso de oxidación total)
- Estabilización por contacto
- Sistemas fijos de película biológica (percoladores)
- Reactores biológicos giratorios (discos biológicos)
- Tratamientos anaerobios: proceso de contacto, filtros

*Tratamiento terciario o avanzado*

- Microtamizado
- Filtración (lecho de arena, antracita, distomeas...)
- Precipitación y coagulación
- Adsorción (carbón activado)
- Flotación y destilación
- Intercambio iónico
- Ósmosis inversa
- Electrodiálisis
- Cloración y ozonización
- Procesos de reducción de nutrientes
- Otros

## 1.5 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE PELÍCULA BIOLÓGICA

El tratamiento secundario de las aguas residuales se puede efectuar en reactores de película biológica, poniendo en contacto dichas aguas con una población microbiana mixta, en forma de una película de lama adherida a la superficie de un medio sólido de soporte, comúnmente llamada superficie de contacto. En todos los casos el agua residual se mueve en relación con la película de lama microbiana y el soporte sólido al que está adherida. Cualquier superficie en contacto con un medio nutriente que contenga microorganismos desarrollará una capa biológicamente activa, comúnmente llamada biomasa o biopelícula.

Existen dos grandes grupos de procesos biopelícula:

- **Sistemas estacionarios o de medio fijo;**  
en este caso, el agua residual se mueve en relación con la biomasa, y el soporte sólido al que está adherida permanece fijo. A este tipo de sistemas se les llama percoladores.
- **Sistemas de medio en movimiento;**  
al contrario del anterior, el material de soporte con la biomasa adherida se mueve a través del líquido. Comúnmente se les conoce como reactores biológicos giratorios.

En términos de ingeniería, estos sistemas son reactores biológicos que ponen en contacto gas, líquido y microorganismos; sin embargo, en el contexto del tratamiento de aguas residuales, se les conoce por una serie de nombres diferentes, la mayoría de los cuales son inapropiados. En general, usualmente se les llama "filtros biológicos", o "biofiltros"; en el caso de sistemas con medio fijo, "filtro de goteo", "filtro de percolación", "percolador", o "lecho bacteriano"; y a los sistemas con medio móvil, "filtro biológico rotatorio", "contactores biológicos rotatorios", o "biodiscos", por ser el tipo de reactores comúnmente utilizados.

"El uso del término 'filtro' es especialmente incorrecto, ya que el proceso de purificación efectuado en estos sistemas tienen poco en común con la operación unitaria de ingeniería química de la filtración, y origina frecuentemente una mala interpretación del mecanismo de la purificación. Fuera de la adsorción y aglomeración del material en la lama microbiana, la filtración en el sentido de la separación de un sólido de un líquido atrapándolo en una matriz porosa, tiene un papel de poca o ninguna importancia en el proceso de purificación. Además, la filtración en su verdadero sentido se usa comúnmente en las plantas de tratamiento de aguas residuales como un proceso subsiguiente en la manipulación de los lodos, de manera que podría originar una mayor confusión".<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup> Winkler, "Tratamiento biológico de aguas de desecho", 1995, p. 185

### Formación de la película biológica

Si se comienza con un medio de soporte limpio, el crecimiento inicial de la biopelícula podrá necesitar varias semanas para alcanzar su desarrollo sobre la superficie de contacto, un proceso que se conoce como "maduración". La lama se desarrolla a partir de los organismos presentes en las aguas residuales o colocados de modo artificial en ellas. Al principio, la eficiencia de purificación es baja, pero cuando el agua residual fluye sobre el medio de soporte cubierto de lama, el oxígeno y los otros nutrientes son consumidos por los microorganismos, éstos crecen y engruesan la película.

Sin embargo, cuando la película es suficientemente gruesa, se separa del medio de soporte por su propio peso y el flujo del líquido la arrastra fuera del sistema. Además, las regiones cercanas a la superficie sólida y más alejadas del líquido se vuelven anaeróbicas. Esta condición es una de las causas del inicio del proceso de desprendimiento, ya que las capas anaeróbicas padecen hambre, mueren, se disuelven y se separan de las superficies de contacto, y la película remanente de microorganismos puede tener viabilidad defectuosa. Las condiciones anaeróbicas también pueden originar la formación de cavidades de gas en la película, lo que aumenta el proceso de desprendimiento.

La eficiencia de purificación alcanza un máximo cuando hay una delgada película de lama completamente aeróbica; conforme ésta aumenta, las regiones más profundas se vuelven inactivas o anaeróbicas, disminuyendo la eficiencia del sistema.

"Así, a pesar de que una película puede tener un espesor de varios milímetros, sólo una capa exterior de 0.05 a 0.15 de profundidad podrá ser aeróbica...El espesor de la película que proporciona máxima eficiencia ha sido citado como 0.25 mm".<sup>9</sup>

A pesar de lo descrito anteriormente, la capa de microorganismos que habita más allá de la capa activa no es completamente superflua, ya que actúa como un amortiguador y proporciona al sistema la capacidad de moderar los efectos de los cambios en la temperatura o las cargas de choque. Al disminuir la temperatura, también disminuye la actividad biológica y la difusión de nutrientes y oxígeno dentro de la película.

La profundidad de la película de lama depende de las características de las aguas residuales en tratamiento, y de la ecología microbiana desarrollada sobre el sistema de soporte; así, algunos residuos industriales ricos en nutrientes, como los desechos de las industrias de procesamiento de alimentos, estimulan la formación de películas espesas que pueden alcanzar varios milímetros de profundidad.

Una de las grandes ventajas de los reactores biológicos giratorios sobre los sistemas estacionarios, es la posibilidad de controlar el espesor de la película a través de la velocidad de rotación. Más adelante se describe este proceso.

---

<sup>9</sup> Winkler, "Tratamiento biológico de aguas de desecho", 1995, p. 189

### Requerimientos de las superficies de contacto

El sistema que soporta a la película de microorganismos está expuesto a sustancias de diferente composición y a cargas variables; además, la lama se puede acumular hasta un grado tal que impida el flujo del líquido y del aire. Así, el diseño de una superficie de contacto debe:

- Proporcionar un soporte sólido y estable para la biomasa.
- Exponer la máxima área superficial al flujo de líquido bajo tratamiento.
- Ser inerte a las sustancias en contacto con él, de manera que no inhiba el crecimiento de los microorganismos ni que sea atacado por las sustancias presentes en las aguas residuales bajo tratamiento.
- Ser suficientemente resistente para soportar su propio peso y el de la biopelícula asociada, pero de peso ligero a fin de reducir los costos estructurales.
- Permitir suficientes espacios entre las superficies adyacentes para que pueda crecer la biomasa sin que los intersticios queden bloqueados, y permitir así el flujo de líquido y aire.
- Proteger a la biopelícula de modo que ésta no se desprenda completamente del sistema.
- Impedir la acumulación del agua, ya que algunas regiones se verían privadas de nutrientes y oxígeno, ocasionando pérdidas de eficiencia.
- Proporcionar suficiente tiempo para la oxigenación adecuada de la película.
- Tener un costo global atractivo, en función de la eficiencia de purificación.

### 1.6 REACTORES BIOLÓGICOS FIJOS

En un sistema estacionario se rocía y distribuye el agua en tratamiento sobre un lecho circular o rectangular que contiene el medio de soporte; así, las superficies mojadas del empaque desarrollan una película de microorganismos. Cuando el agua y el aire circulan a través de los espacios intersticiales que existen entre el material de soporte, los organismos presentes en la biopelícula oxidan la materia orgánica que toman del agua residual. Una vez que ésta atraviesa el lecho se transfiere a un sedimentador secundario para sedimentar la biopelícula desprendida del medio.

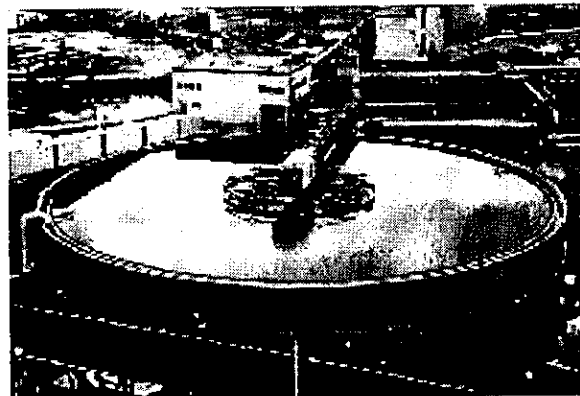
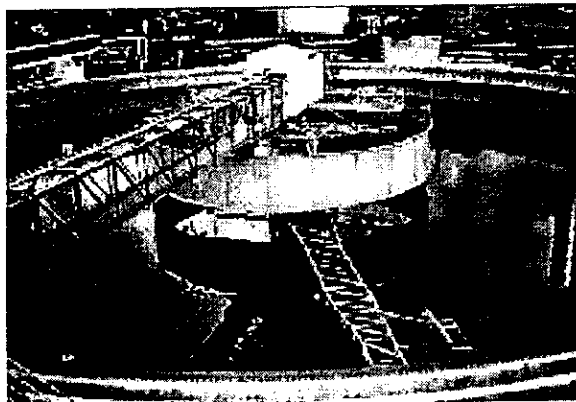
Las dimensiones del lecho que contiene el material de soporte depende de la naturaleza del medio y de la concentración y tipo del agua residual a tratar. Así, un lecho de percolación usado para el tratamiento de aguas negras domésticas mide típicamente alrededor de 2 m de profundidad y 10 m de diámetro, pero los utilizados para el tratamiento de aguas industriales pueden medir hasta 40 m de diámetro y en algunos casos la profundidad puede ser de hasta 12 m.<sup>10</sup>

<sup>10</sup> Información obtenida de: Rigola, "Tratamiento de aguas industriales...", 1989, p. 149

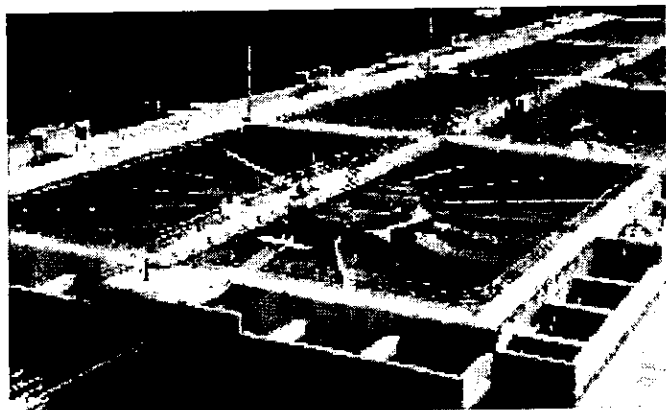


Los percoladores se han utilizado desde hace mucho tiempo (1887) en el tratamiento de aguas residuales, debido a la sencillez de diseño y explotación.

En los lechos circulares, al agua se distribuye por rociadores montados en brazos giratorios como se muestra en las siguientes figuras.



Este tipo de percoladores son de uso común, pero se pueden usar los lechos rectangulares donde se requiera la máxima utilización de un área restringida. En estos lechos, el agua se distribuye por medio de un canal transversal que se mueve hacia adelante y hacia atrás, o por medio de rociadores fijos, situados a intervalos apropiados sobre la superficie del lecho, como se muestra a continuación.



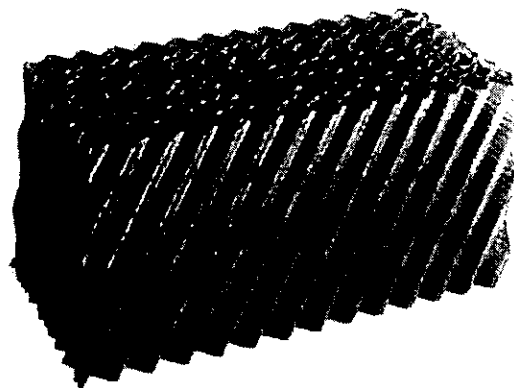
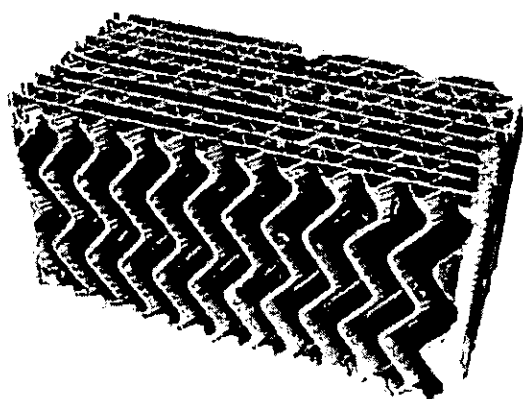
Las diferencias entre los sistemas de percolación se basan principalmente en el material utilizado como empaque para formar el lecho. Los tipos de empaque en uso común se pueden clasificar en dos grupos: medios minerales o "convencionales", y los medios especialmente fabricados, de reciente desarrollo, contruidos generalmente con materiales plásticos.

En los medios minerales comúnmente se usan piedras, coque metalúrgico, cerámica, escombros o ladrillos rotos. La principal desventaja es su peso, que limita de un modo efectivo la profundidad del lecho, y los reducidos espacios vacíos, donde la mitad del volumen está ocupado por él mismo.

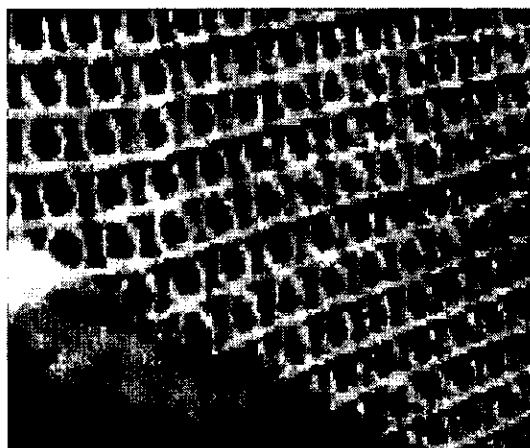
Estos problemas se han superado con los medios de materiales plásticos, los cuales se pueden encontrar en varias configuraciones con altas fracciones de espacios, en general mayores del 90%; además, pesan aproximadamente la décima parte de lo que pesan los medios minerales en operación. Esto permite aplicar al lecho grandes cargas de nutrientes orgánicos, sin correr el riesgo de obstruirlo por el excesivo crecimiento de la biomasa.

Los empaques de plástico se pueden clasificar en medios ordenados y medios al azar; los primeros se forman por la distribución de superficies cuidadosamente orientadas, con el fin de proporcionar una óptima distribución del líquido que fluye sobre ellas; y a su vez, se pueden clasificar como:

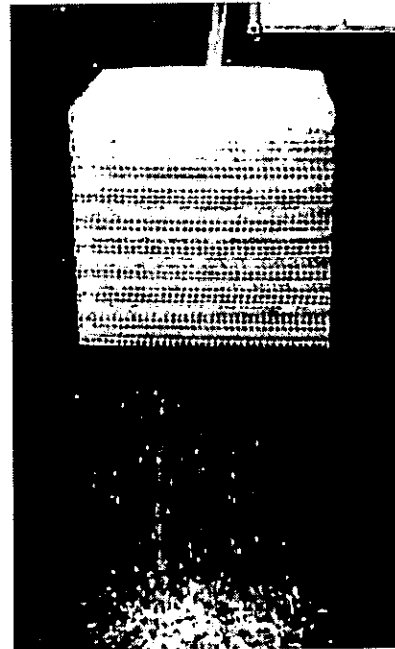
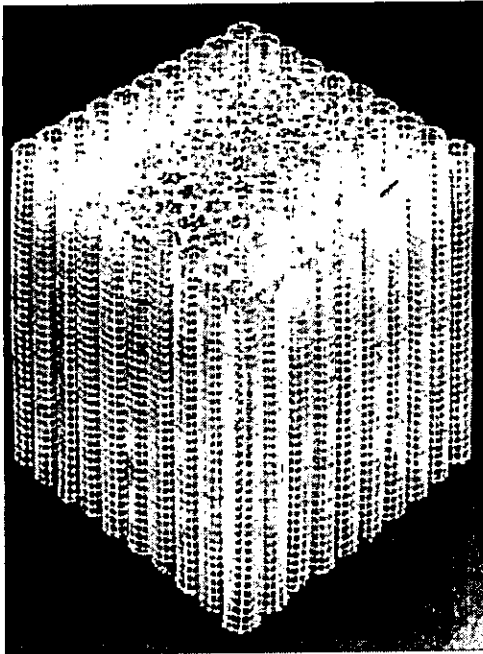
- 1) Medios de láminas verticales. Consisten en láminas de plástico corrugadas y acanaladas (separadas entre 40 y 60 mm), por lo general de PVC, ensambladas para formar un bloque o módulo que contiene numerosos canales abiertos en zigzag (ver figuras inferiores), dichos módulos se apilan en posición vertical para formar el lecho del tamaño deseado.



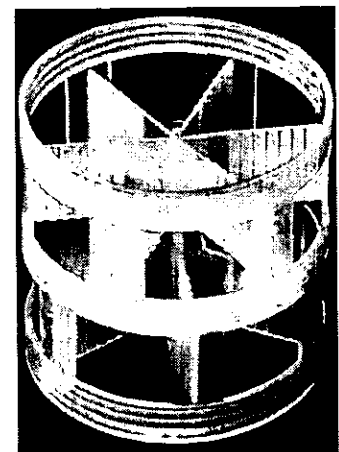
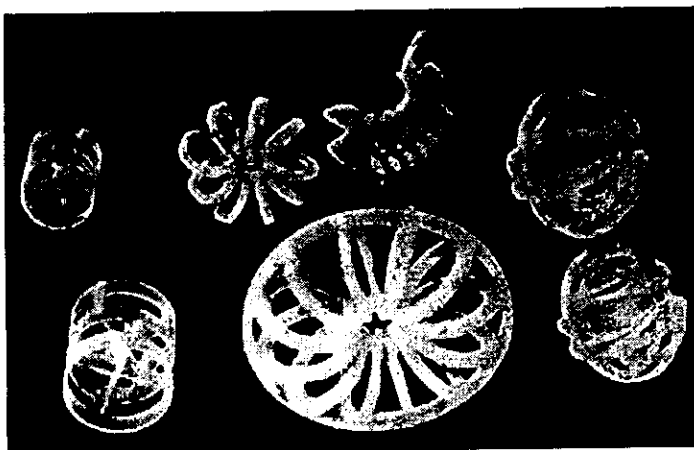
- 2) Medios de tubos verticales. Consiste en un ensamblaje empacado de tubos verticales, fabricados de PVC no plastificado y que se extiende a toda la profundidad del lecho (entre 4 y 6 m). La eficiencia de un medio tubular depende de la uniformidad de la distribución del líquido en la parte superior del lecho, ya que una vez que el líquido entra al tubo se quedará ahí hasta llegar al fondo del lecho, y un tubo que no reciba suministro se quedará seco en toda su longitud.



3) Medios de redes geométricas. Se fabrican con cilindros verticales formados por redes plásticas, ensamblados para formar módulos con estructura de malla geométrica, la que proporciona fácil acceso del aire y facilita el desprendimiento de la película biológica.

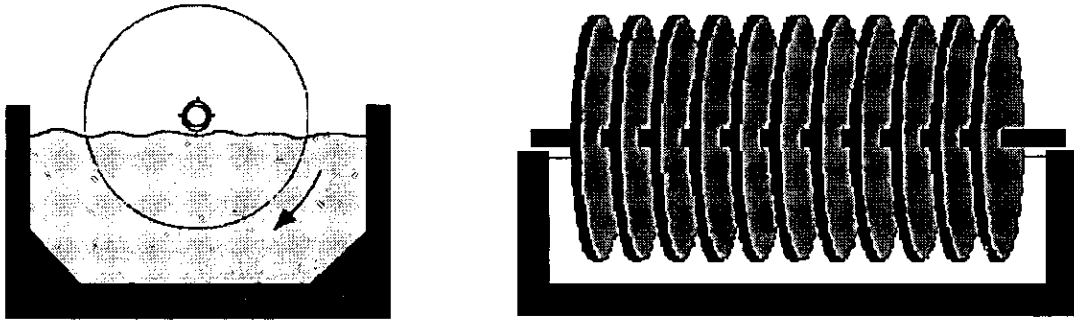


Los medios de empaque al azar consisten en piezas plásticas de forma especial, apiladas sin una orientación determinada dentro de una estructura de sección circular o rectangular. Estas piezas son anillos o tubos cortos de PVC o polipropileno; su área superficial se aumenta con la inclusión de ondulaciones internas o aletas. El lecho se arma volcando la masa de piezas dentro del recinto, utilizando un transportador neumático o una banda transportadora, o vaciándolos uno después del otro.



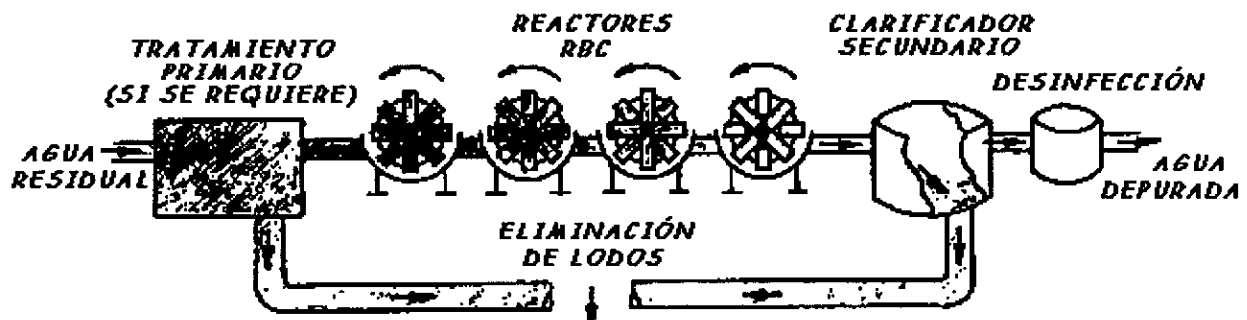
## 1.7 REACTORES BIOLÓGICOS GIRATORIOS

Los "reactores biológicos giratorios", RBC (Rotating Biological Reactors) son sistemas de medios en movimiento, formados por una estructura de diseño especial que gira lentamente sobre un eje horizontal. Una película de microorganismos se acumula sobre el medio de soporte parcialmente sumergido dentro de un tanque, a través del cual fluyen las aguas en tratamiento. La biomasa se ve así expuesta sucesivamente a los nutrientes en las aguas residuales y al aire, según gira el medio. El espesor de la biopelícula se autorregula por el rozamiento con el agua.



El tanque que contiene el líquido tiene un ajuste muy estrecho con el medio giratorio, y el flujo del líquido dentro del tanque, combinado con la rotación del medio, produce un esfuerzo cortante hidráulico sobre la biopelícula, ocasionando una eficiente transferencia de nutrientes a los microorganismos y aumentando el desprendimiento del exceso de lama dentro del tanque; ésta se mantiene en suspensión debido a la turbulencia ocasionada por el movimiento del medio.

Después de la depuración biológica, el agua se evacua a un clarificador donde se produce la sedimentación y extracción de la biomasa excedente. Normalmente el agua a tratar atraviesa más de un reactor, llegándose a montar hasta cuatro unidades en serie o en paralelo, antes de la decantación.



El medio de soporte se puede obtener con diversas configuraciones, como discos (biodiscos), construcción de retículas o un recipiente de rejilla de alambre con un medio plástico aleatorio (biocilindros).

### Biodiscos

La configuración de discos es la más común y más antigua, la patente original fue registrada en Alemania por Weigand en 1900. Su patente describe un cilindro formado por tablas de madera. Se construyó hasta 1930 por Bach e Imhoff, que lo utilizaron para mejorar la eficiencia de los tanques Emscher.

En 1929, en E. U. A., J. Doman utilizó discos metálicos giratorios como medio de soporte, pero los resultados no fueron alentadores y la investigación se suspendió.

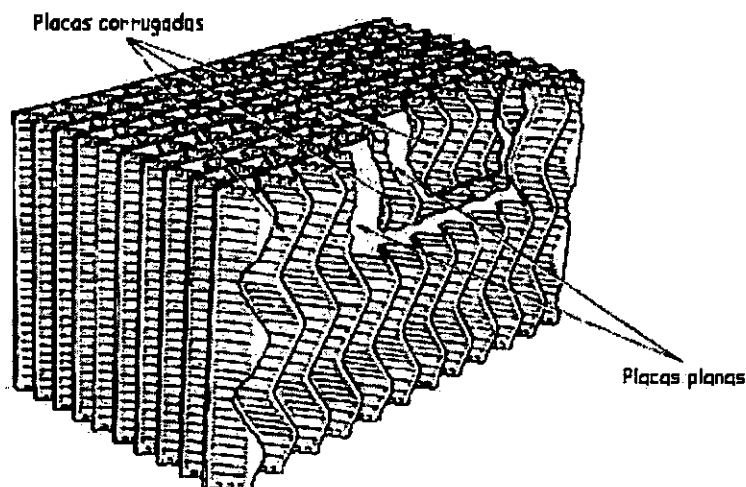
Con el advenimiento de los plásticos, en la década de los cincuenta, se lograron medios ligeros apropiados, generalizando notablemente la utilización del proceso. Así, en la universidad de Stuttgart (Alemania) se retomaron las investigaciones anteriores y se realizaron pruebas exitosas con discos de plástico de 1 m de diámetro. Posteriormente, Pöpel y Hartmann utilizaron poliestireno expandido y es entonces cuando se inicia el uso comercial del sistema, así:

- En 1957, la compañía J. Stengelin, en Alemania Occidental, fabrica discos de 2 y 3 m de diámetro y la primera instalación comercial se hace en 1960; sin embargo, el proceso aún no era competitivo debido a los elevados costos de fabricación.
- Al principio de los sesenta, en E. U. A., la compañía Allis-Chalmers investiga el uso de discos giratorios para diversas aplicaciones en procesos químicos. Llamaron a su proceso "Reactor de dos fases" (TPC) y fue utilizado para la absorción de gases, extracción líquido-líquido y otras aplicaciones de transferencia de masa.
- Durante el verano de 1965 la planta de Jones Island en Wisconsin utilizó un sistema con discos de 1 m de diámetro para la transferencia de oxígeno dentro de un proceso de aereación, posteriormente se experimentó sin recirculación y con biomasa adherida. Los resultados fueron favorables y el proceso fue llamado "Rotating Biological Contactor" RBC.
- En 1968 se establece un acuerdo de licencia entre la compañía Allis-Chalmers y fabricantes alemanes para la producción, venta y distribución en los Estados Unidos. El proceso se vende bajo el nombre comercial de Bio-Disc.
- En 1970 Allis-Chalmers vende la tecnología de RBC a la corporación Autotrol, y en 1972, éste último anuncia el desarrollo de un nuevo material de soporte construido con hojas corrugadas de polietileno. La densidad de área superficial se aumenta de  $52.5 \text{ m}^2/\text{m}^3$  del disco de poliestireno, a  $121 \text{ m}^2/\text{m}^3$  con los discos corrugados de polietileno de alta densidad.

Actualmente, en la mayoría de los diseños se utilizan discos, lisos o corrugados, normalmente fabricados de poliestireno o polietileno de alta densidad. Estos discos se mantienen paralelos entre sí y unidos a un eje horizontal que pasa a través de sus centros. Aproximadamente el 40% de la superficie de los discos está sumergida en el agua residual en todo momento. La separación entre discos varía de 15-40 mm y la longitud del eje es de aproximadamente 7.5 m, pudiendo alojar de esta forma un gran número de discos. Los parámetros de diseño comúnmente encontrados son<sup>11</sup>:

• Carga hidráulica	0.01-0.06 (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )
• Diámetro de los discos	< 3.7 (m)
• Velocidad de giro del disco	2-5 (RPM)
• Número de etapas	3-4
• Velocidad periférica de los discos	15-30 (cm/s)
• Concentración del fango decantado	2-5 %
• Longitud del eje	< 7.6 (m)
• Superficie sumergida de los discos	40-90 %
• Potencia a instalar	75 (W/m de eje) ( $\phi=3$ m) 50 (W/m de eje) ( $\phi=2$ m)

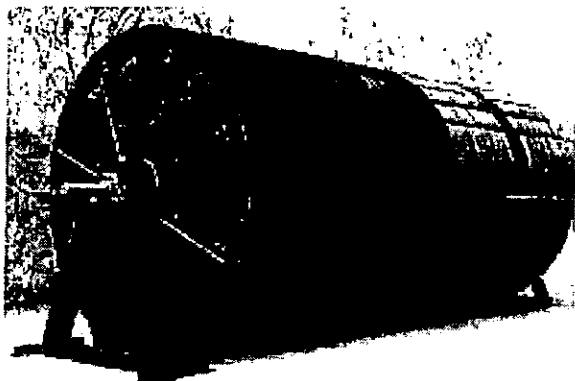
Con mucha frecuencia los discos están formados de placas alternadas planas y corrugadas como se muestra en la figura inferior. Esta disposición suministra un área superficial mayor, que en el caso de discos con superficies planas únicamente. Así, con discos de 3.6 m de diámetro montados sobre un eje de 7.5 m de longitud puede lograrse un área superficial total superior a los 9 000 m<sup>2</sup>. Este sistema de biodiscos es capaz de recibir, aproximadamente, 5 litros de agua residual por segundo, caudal equivalente a una población de 2500 habitantes.



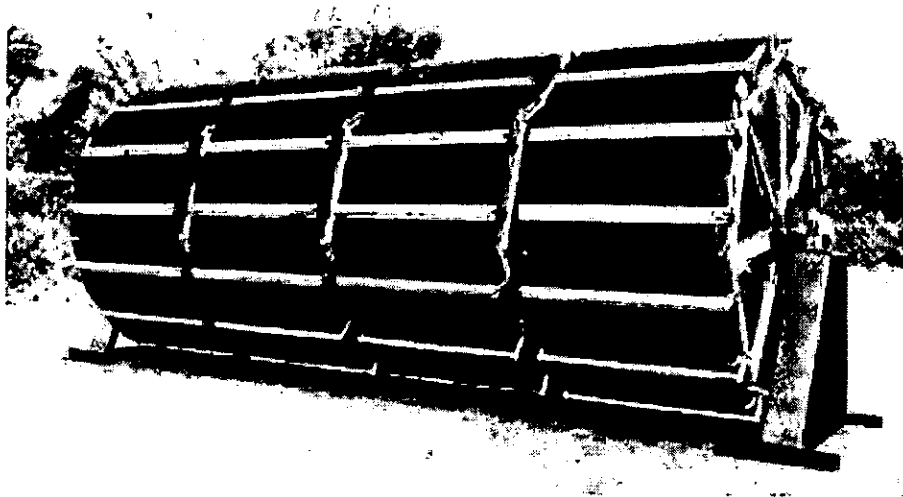
<sup>11</sup> Información obtenida de: Collado, "Depuración de aguas residuales...", 1992, p. 88

A continuación se muestran algunos de los reactores biológicos giratorios disponibles en el mercado:

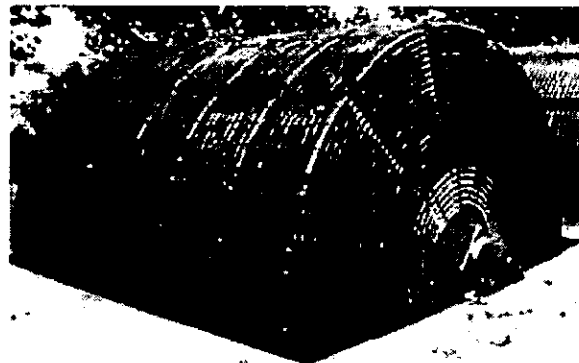
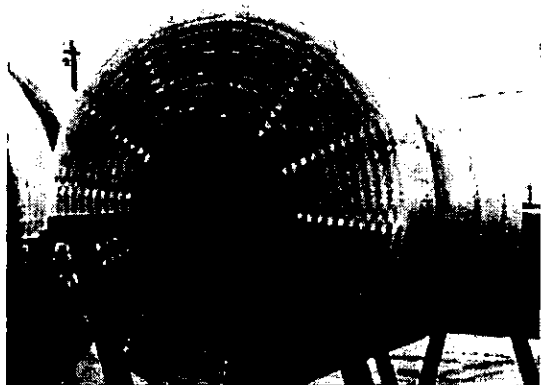
- WALKER & WASTEWATER Industry



- CLOW, Waste Treatment Div.



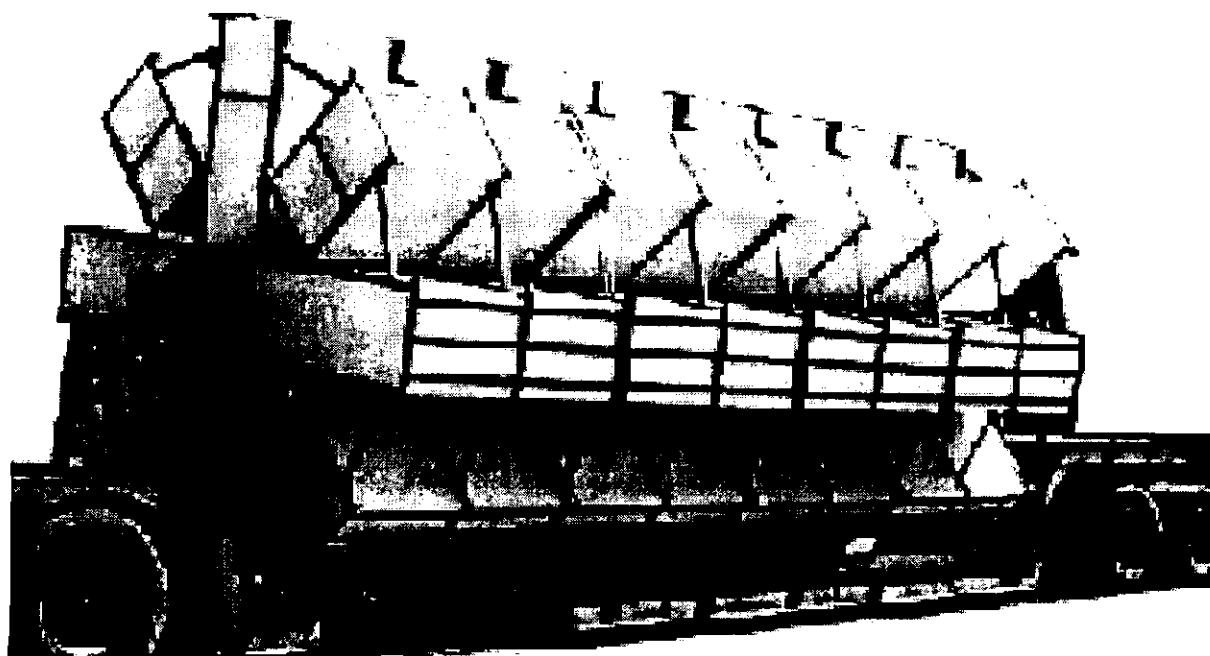
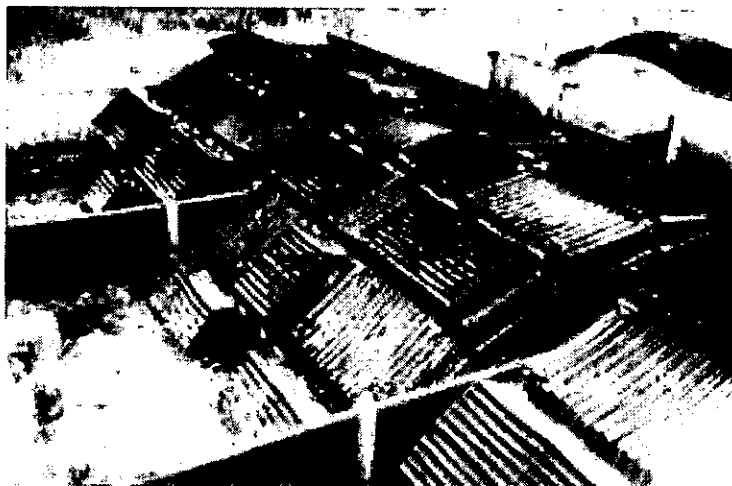
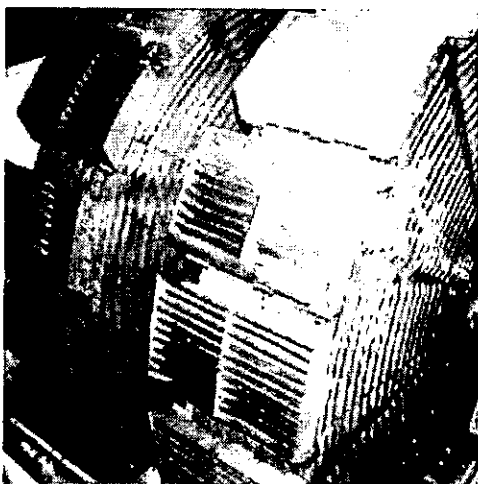
- AUTOTROL Corporation



Como se puede observar en las figuras anteriores, algunas empresas incluyen las cuatro etapas del tratamiento en un sólo eje, con lo que se disminuyen los costos de fabricación, pero se complica el diseño estructural del sistema.

Una variante de los biodiscos es colocar conjuntos de placas, horizontales y radiales al eje, alternadamente como se muestra en las figuras siguientes. En este caso el sistema se sumerge un 90% en el agua a tratar.

Cuando el sistema está sumergido sólo un 40%, como en los casos anteriores, el contacto periódico con el aire es suficiente para aportar el oxígeno necesario para la actividad celular, en este caso se requiere un pequeño motor de accionamiento exterior para hacer girar el eje. Los sistemas más sumergidos pueden llevar un aporte exterior de aire a presión que simultáneamente oxigena la masa orgánica y hace girar el conjunto.



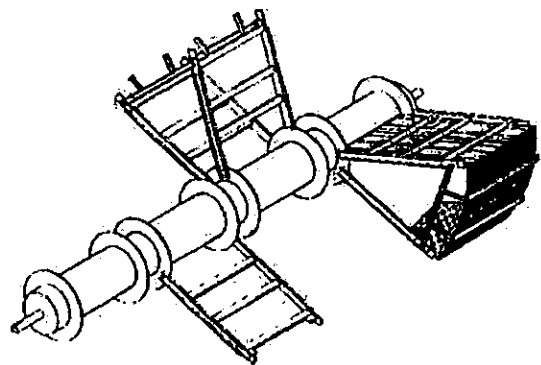
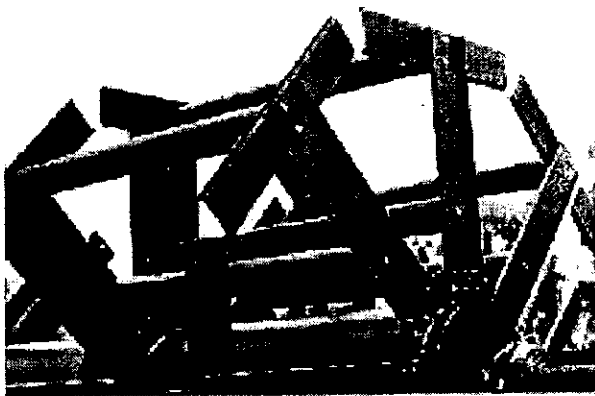


Algunas de las ventajas de los sistemas RBC respecto a los tratamientos convencionales son:

- Bajo consumo de energía.
- Explotación y mantenimiento simple y sencillo.
- Menor volumen de depósito del reactor.
- No existe recirculación de fangos secundarios.
- La biomasa presenta en general buenas características de sedimentación con lo que se disminuye el costo de la clarificación secundaria.
- Flexibilidad de instalación con otros sistemas (serie o paralelo).
- Mayor resistencia a sobrecargas hidráulicas.
- Posibilidad de diseñar el proceso con nitrificación.
- No se presentan problemas de aerosoles y ruidos.
- Menores problemas de espumas.
- Facilidad de ampliación en el futuro.
- Flexibilidad en el proceso, ya que es posible tener en cada etapa un cultivo biológico diferente.

Algunos de sus inconvenientes son:

- Necesidad de un soporte especial. Debido al gran diámetro de los discos utilizados en los RBC es necesario seccionarlos para su manufactura, por lo que se requieren estructuras especialmente diseñadas para soportar los módulos (ver siguientes figuras).



- Montaje complicado. Si se requiere cambiar la placa de alguna sección, es necesario desmontar el módulo completo, y a veces también los módulos adyacentes a éste.
- Necesidad de un diseño mecánico riguroso.

- Otra desventaja es la presencia de una película líquida de gran superficie sobre la zona húmeda de los discos expuestos al aire, que en climas fríos puede provocar la congelación de la biomasa. Algunas compañías utilizan tanques cubiertos (figura siguiente) para evitar malos olores en tiempo de calor, y para contrarrestar el efecto de la temperatura en climas fríos.



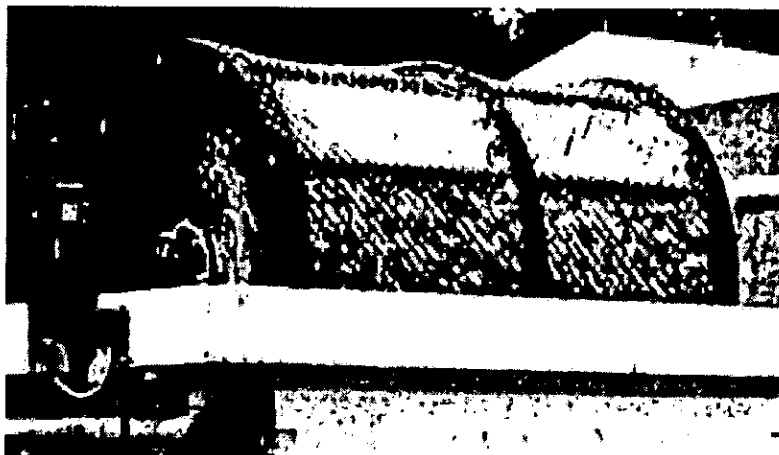
Debido a la densidad de la biomasa que se puede mantener sobre la superficie de soporte en los biodiscos sólo se requiere el 10% de terreno para lograr los mismos resultados que un percolador convencional. Así, aunque el sistema se empezó a utilizar para el tratamiento de aguas residuales de pequeñas comunidades, cada vez se usa más en el tratamiento de desechos industriales.

### Biocilindros

Partiendo de este modelo han surgido otros diseños, sustituyendo los discos por otros elementos como son los cilindros rellenos de material plástico de diversas formas, denominados biocilindros.

Los materiales utilizados pueden ser esferas tejidas de alambre de acero inoxidable, toroides tejidos de polipropileno, espuma reticulada de poliéster, hojas reticuladas de polipropileno en forma de esferas, etc.

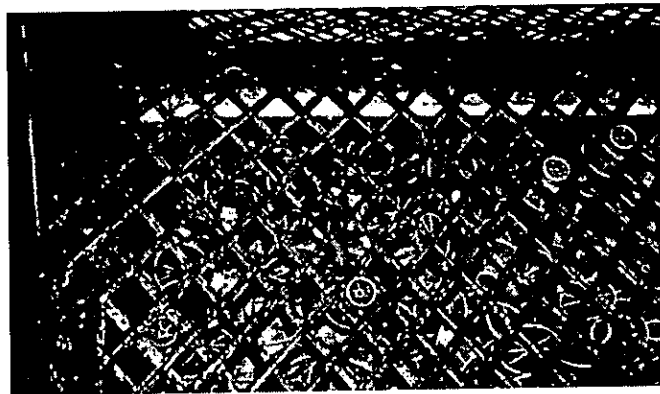
Estos elementos están contenidos aleatoriamente, dentro de una rejilla de alambre en forma de cilindro, que se hace girar por medio de un motor mecánico o hidráulico.



Debido a que los elementos giran con el sistema, se elimina el peligro de bloqueo del lecho por la acumulación de lama; sin embargo, cuando el medio está en movimiento, las partículas se golpean entre sí eliminando la película de microorganismos que habita en su superficie exterior, de modo que la eficiencia de purificación para la que fueron diseñados disminuye considerablemente.



Aumentado la densidad de elementos plásticos dentro del biocilindro, se reduce el movimiento relativo entre ellos, pero los efectos de rozamiento no se eliminan, por lo que, después de cierto tiempo en operación, la biomasa habita únicamente en el interior del medio.

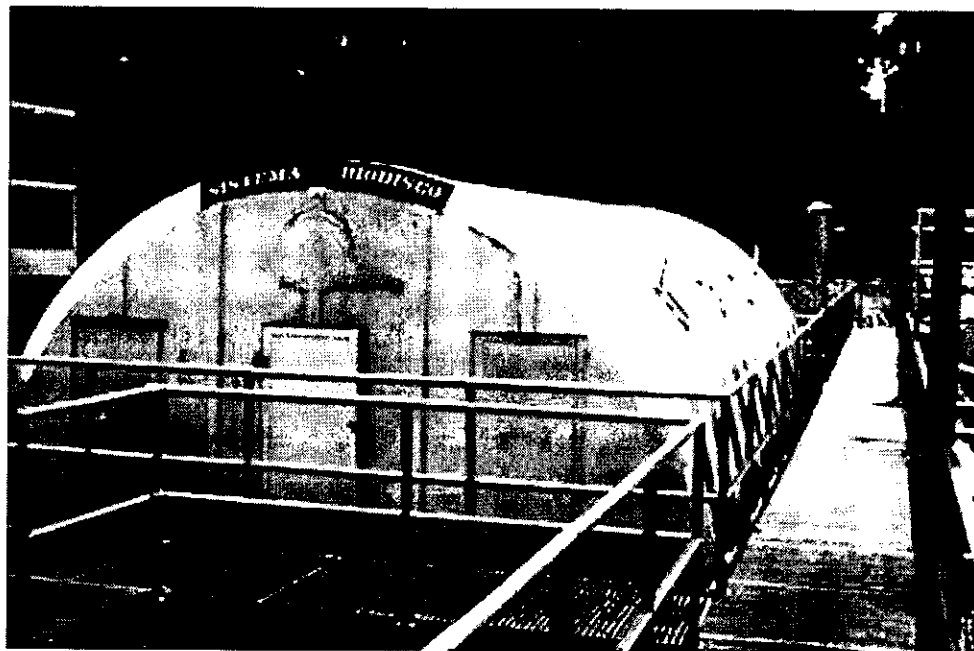


Dependiendo del diseño de estos elementos, en algunas ocasiones, una gran acumulación de película biológica puede también producir "agrupamientos" de las partículas, cuando varias de éstas quedan unidas por medio de cadenas de microorganismos. En este caso es difícil que lleguen los nutrientes y el oxígeno necesario para la degradación de la materia orgánica a todos las zonas del sistema, disminuyendo su eficiencia.

Por estas razones estos sistemas se utilizan muy poco en las plantas de tratamientos de aguas residuales.

## 1.8 INCONVENIENTES DEL DISEÑO ACTUAL

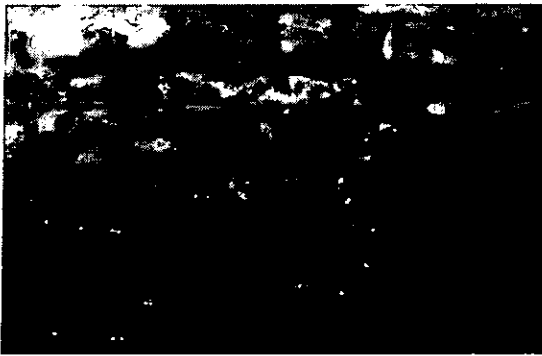
Hace varios años, algunos investigadores de la UNAM diseñaron un sistema de biodiscos corrugados semejantes a los existentes en el mercado internacional, con la finalidad de contar con tecnología nacional y evitar los costos de los equipos importados. Después de funcionar por más de 10 años se recopilaron datos sobre los problemas y ventajas que tuvieron estos equipos.



Los principales problemas que se presentaron fueron:

- Costo de manufactura. El plástico laminado del tamaño requerido para las placas de los biodiscos solamente lo produce una empresa en México, siendo su costo muy elevado.
- Resistencia de materiales y corrosión. El eje que sostiene a los discos se fractura cuando se vacía el tanque para limpiarlo.
- Diseño de la superficie de contacto. Las bacterias crecen formando cadenas, cuando éstas son muy largas, cierran el espacio que existe entre los discos y el área efectiva de trabajo disminuye sensiblemente.
- Cuando la temperatura baja considerablemente, las cadenas de microorganismos existentes entre los discos, se endurecen, provocando grandes esfuerzos que llegan a colapsar las placas.

En las siguientes figuras se puede observar la película de microorganismos desarrollada sobre los biodiscos que actualmente operan en la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria, UNAM.



## 1.9 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

El Programa Universitario de Medio Ambiente de la UNAM (PUMA) solicitó al Centro de Diseño y Manufactura (CDM) de la Facultad de Ingeniería el diseño de un nuevo reactor biológico giratorio que sustituyera a los biodiscos comerciales actualmente utilizados.

Las características del equipo que el PUMA solicitó al CDM son:

- Sustituir a los discos corrugados de polietileno de alta densidad, utilizados actualmente, por otro medio de soporte del mismo material, más eficiente, de menor costo y que ofrezca mayor densidad de área de contacto ( $m^2$  de biopelícula /  $m^3$  de volumen del sistema).
- Resolver los problemas de resistencia de materiales y corrosión a través de un diseño estructural más riguroso.
- Diseñar un sistema modular, de tal modo que se adapte tanto a las necesidades existentes en pequeñas poblaciones, como al tratamiento de desechos industriales; con posibilidades de ampliación en el futuro, de acuerdo a las circunstancias de la planta.
- Desarrollar un sistema competitivo internacionalmente, capaz de purificar las aguas residuales con la misma o mayor eficiencia que los sistemas comerciales a un menor costo.

El material del medio de soporte, al igual que en el caso de biodiscos, debe ser polietileno de alta densidad, debido en primer lugar a su bajo peso, y por otro lado, a las características eléctricas de este polímero pues éstas permiten que la película de microorganismos se mantenga adherida a su superficie.

En este proyecto no se analizará la eficiencia biológica de purificación; por lo que al término del mismo se fabricará un prototipo para instalarlo en la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria, y durante seis meses, realizar las pruebas necesarias para verificar que su funcionamiento sea el previsto. Posteriormente se harán los ajustes necesarios para patentar la tecnología.

Así, para el diseño de este sistema se considera que:

- El agua que recibe el sistema ha pasado por un tratamiento primario, de tal forma que no tiene residuos sólidos en suspensión que pudiera dañar el medio de soporte.
- La densidad de la biopelícula es de  $1000 \text{ kg/m}^3$ .
- El espesor de la biomasa no excede de 0.5 mm si se mantiene el esfuerzo cortante hidráulico que se produce en el sistema actual de biodiscos.
- Una separación de 15 mm entre superficies de contacto es suficiente para evitar que la formación de cadenas bloquee el medio de soporte.
- Con una velocidad tangencial de 30 m/min en la periferia del sistema se proporciona el tiempo suficiente para la oxigenación adecuada de la biomasa.

### 1.10 METODOLOGÍA UTILIZADA EN EL DISEÑO

Para realizar el diseño del nuevo sistema para la depuración de aguas residuales durante el proyecto se siguió la siguiente metodología de diseño, tradicionalmente utilizada en el CDM:

- Identificación del problema. Se visitó la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria para observar cuidadosamente el proceso de purificación biológica de los biodiscos instalados actualmente, se definieron los propósitos y alcances del nuevo diseño, y se establecieron las consideraciones necesarias para la realización del proyecto, anteriormente descritas.
- Estudio del problema. Se buscó información sobre los procesos y técnicas para la depuración de aguas existentes en el mercado internacional, expuesta anteriormente, tanto en bibliografía especializada como vía internet con productores de este tipo de sistemas. De la información recopilada se encontró que existe un patrón común para los biodiscos giratorios, que no ha variado mucho desde sus inicios; también se estudiaron otros sistemas de depuración biológica, pero al analizarlos y comentarlos con el PUMA, se confirmó la idea original de utilizar un sistema giratorio con un medio de soporte para la biomasa.
- Diseño conceptual del medio de soporte. Debido a que se debía superar la densidad de área superficial de los discos planos, se propusieron diversas opciones para optimizar el área de contacto que sustituyera a los biodiscos. Se generaron aproximadamente 50 opciones que se compararon cuantitativa y cualitativamente con los discos planos, estableciendo diversos criterios de selección.

- **Modelo.** Una vez determinada la opción que más se acercaba a los propósitos del diseño, se construyó un modelo experimental para comprobar los principios propuestos y determinar la mejor configuración para el sistema de soporte.
- **Diseño del proceso de ensamble del medio de soporte.** Para facilitar la fabricación y el ensamble del medio de soporte propuesto se diseñó un ensamblador en él que se podrán acomodar y armar manualmente los elementos que constituyen el medio de soporte.
- **Diseño conceptual de la estructura del sistema.** Se propusieron las características de la estructura que debe soportar el medio de soporte, tomando en cuenta las facilidades de fabricación, transporte y ensamble, así como los costos de producción.

El objetivo de este trabajo es desarrollar cada uno de los puntos expuestos anteriormente y exponer brevemente la forma como se determinaron las cargas que deben soportar los elementos del sistema: análisis necesario para llevar a cabo el diseño de detalle del prototipo en la primera etapa del proyecto.

- **Diseño de detalle.** Se definieron las dimensiones y el material de las piezas que forman, tanto el medio de soporte, como la estructura del sistema. Debido a que éste está sujeto a rotación, el diseño estructural consistió en analizar los esfuerzos que deben soportar cada una de las piezas que lo conforman, en diferentes posiciones (cada  $60^\circ$ ), determinando la posición crítica y la variación de esfuerzos para cada elemento. Así, tomando en cuenta lo anterior y las características del medio, se procedió a definir sus dimensiones, los materiales adecuados y los procesos de fabricación y ensamble.
- **Planos.** Se realizaron todos los planos necesarios para la fabricación y el ensamble del prototipo, exceptuando los de la obra civil, la cual no entró en los alcances del proyecto; sin embargo, se anexó un plano de montaje, en el cual se aprecian las dimensiones que ésta debe tener y las cargas que debe soportar.

Los puntos anteriores constituyen la primera etapa del proyecto; sin embargo, para finalizar el diseño de este nuevo sistema es necesario incluir lo siguiente:

- **Fabricación del prototipo.**
- **Realización de pruebas para verificar su correcto funcionamiento.**
- **Rediseño del sistema en base a las observaciones del prototipo.**
- **Fabricación y ensamble del diseño definitivo.**

## II Definición de la superficie de contacto

### 2.1 PARÁMETROS PARA CALCULAR LA SUPERFICIE DE CONTACTO

Se propusieron diversos arreglos geométricos, dispuestos en un volumen de trabajo, como medio de soporte de la película de microorganismos. Para poder establecer una comparación entre los biodiscos convencionales y las propuestas generadas, en cuanto a la superficie de contacto disponible, se establecieron los siguientes parámetros que se respetan en el cálculo del área de contacto ( $A_c$ ) de cada alternativa:

- Diámetro del volumen de trabajo =  $D = 3 \text{ m}$
- Longitud del volumen de trabajo =  $L = 2.8 \text{ m}$
- Diámetro del eje =  $D_e = 20 \text{ cm}$
- Volumen del espacio disponible =  $V_{ed} = 0.25 \pi (D^2 - D_e^2) L = 20 \text{ m}^3$
- Separación entre superficies =  $S = 15 \text{ mm}$
- Espesor de superficies\* =  $e = 1 \text{ mm}$ 
  - \* En caso de que en esta superficie se adhiriera biopelícula en ambos lados. Si se especifica que la película se adherirá sólo a un lado de la superficie, este parámetro será de  $0.5 \text{ mm}$

Cabe aclarar que lo único que se persigue es la optimización del área de contacto, por lo que se suponen parámetros que necesariamente se modificarán en el diseño de detalle del sistema, al analizar minuciosamente la estructura del medio. Tal es el caso del diámetro del eje, que se considera igual en todas las alternativas, sin tomar en cuenta que en algunos casos, al aumentar el área de contacto, aumenta necesariamente el peso del medio, lo que en el diseño probablemente se traduzca en aumentar su diámetro.

También se definen dos parámetros más que relacionan el área de la superficie de contacto con el volumen que ocupa el material de soporte y con el volumen del espacio disponible, este último indica la superficie de contacto disponible por cada  $\text{m}^3$  del volumen de trabajo, y en los equipos comerciales oscila de 120 a  $200 \text{ m}^2/\text{m}^3$ .

$$\text{a) Densidad del material} = \frac{\text{Área de contacto}}{\text{Volumen del material de soporte}} = \rho_m$$

$$\text{b) Densidad del área de contacto} = \frac{\text{Área de contacto}}{\text{Volumen del espacio disponible}} = \rho_a$$

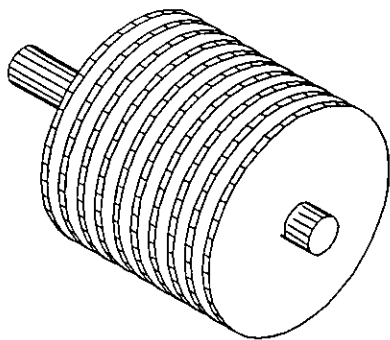


## 2.2 PROPUESTAS PARA SUSTITUIR A LOS BIODISCOS

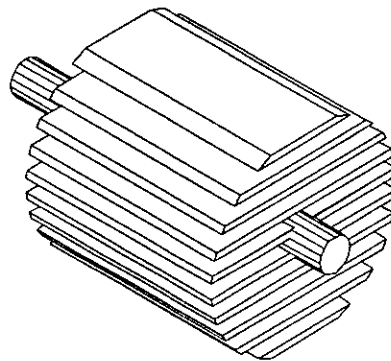
Todos los arreglos propuestos tienen una velocidad relativa nula respecto al eje de giro; es decir; en cada una de las configuraciones que se proponen, no existen elementos independientes, "suelos", que puedan golpearse entre sí, lo que provocaría, al igual que en los biocilindros, el desprendimiento de la biopelícula.

El conjunto de arreglos propuestos se puede clasificar en tres grandes grupos: placas, tubos y ejes.

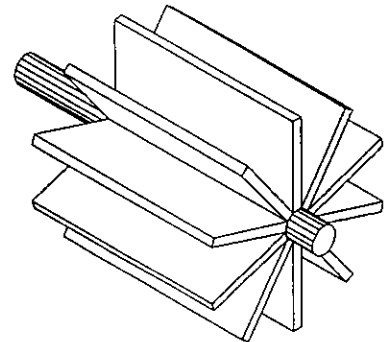
En la configuración de placas, a su vez, se tienen las siguientes alternativas:



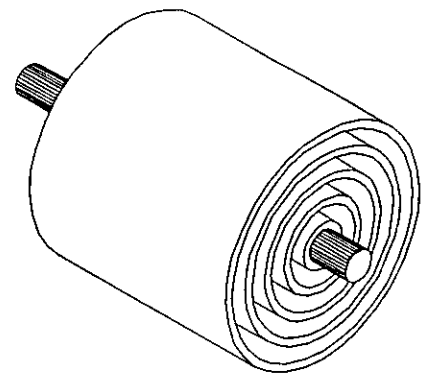
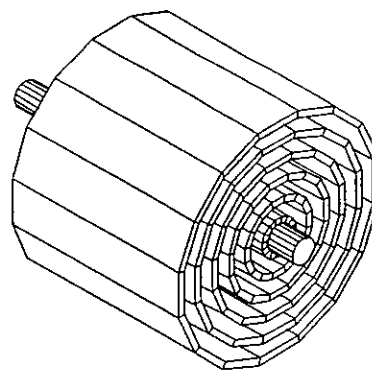
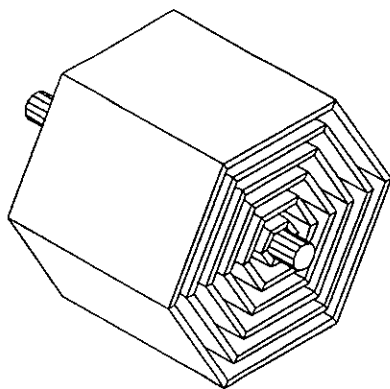
**Discos**



**Placas horizontales**



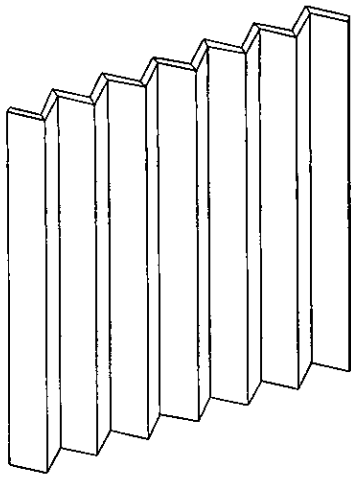
**Paletas**



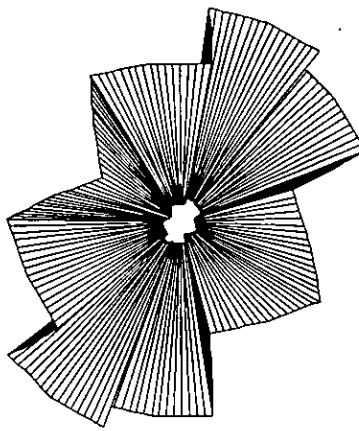
**Polígonos concéntricos**

En las figuras anteriores se muestran las configuraciones propuestas con placas lisas; sin embargo, se puede aumentar la densidad de área de contacto si estas placas se fabrican con algún tipo de corrugado.

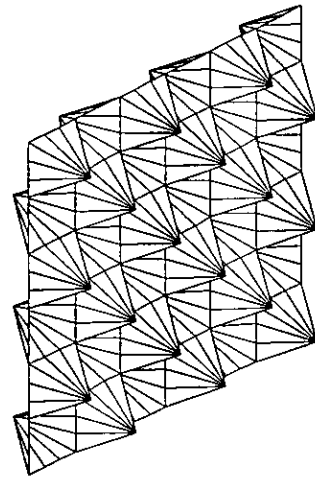
Por ejemplo, se propone que para la configuración de discos se usen placas con los siguientes tipos de corrugado:



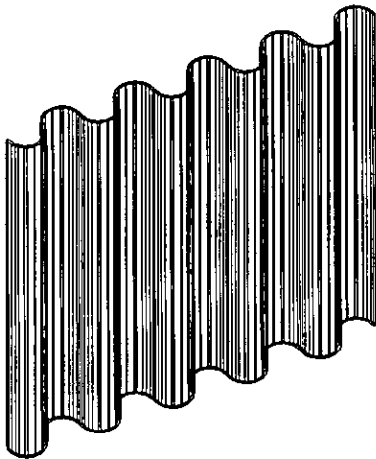
Triangular lineal



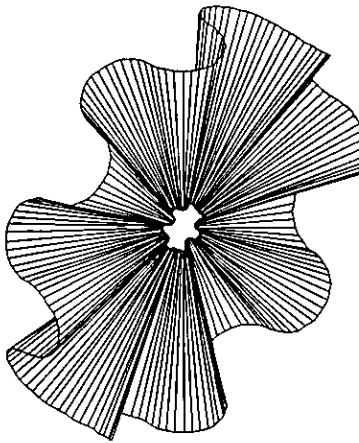
Triangular radial



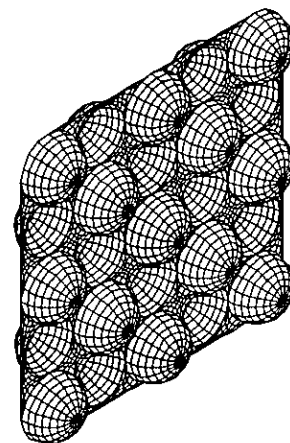
Arreglo triangular



Circular lineal



Circular radial



Arreglo circular

Se puede observar que para los "corrugados triangular" se puede variar el "ángulo de corrugado"; sin embargo, con un ángulo muy cerrado existe el riesgo de que en los vértices se acumulen gran cantidad de microorganismos, provocando la formación de cadenas que podrían cerrar los espacios existentes entre discos, y en consecuencia, la falta de oxigenación de los microorganismos que habitan en la región cercana al centro de los mismos, por lo que el área efectiva de trabajo disminuiría considerablemente. En los corrugados circulares no sucedería lo anterior, pero aumentaría el costo de manufactura de los discos.

En los cálculos del área de contacto y densidad de área de los "corrugados triangular", el "ángulo de corrugado" se varía cada  $30^\circ$ .

Así, para la configuración de discos tenemos:

## 1) Discos lisos

$$A_c = 2505.23 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 125.66 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

## 2) Discos corrugados (triangular lineal)

$\theta$ (°)	$A_c$ (m <sup>2</sup> )	$\rho_a$ (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
30	8129.34	407.67
60	4694.22	235.33
90	3444.43	172.67
120	2860.73	143.33
150	2586.07	129.67

## 3) Discos corrugados (triangular radial)

$\theta$ (°)	$A_c$ (m <sup>2</sup> )	$\rho_a$ (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
30	6997.35	351.00
60	4390.04	220.33
90	3314.42	166.33
120	2797.30	140.33
150	2558.16	128.33

## 4) Discos corrugados (arreglo triangular)

$\theta$ (°)	$A_c$ (m <sup>2</sup> )	$\rho_a$ (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
30	8129.34	407.67
60	4694.22	235.33
90	3444.43	172.67
120	2860.73	143.33
150	2586.07	129.67

## 5) Discos corrugados (circular lineal)

$$A_c = 3023.18 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 151.67 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

## 6) Discos corrugados (circular radial)

$$A_c = 2783.44 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 139.67 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

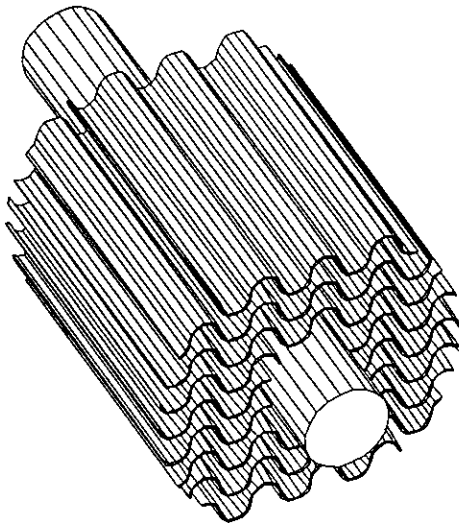
## 7) Discos corrugados (arreglo circular)

$$A_c = 3436.2 \text{ m}^2$$

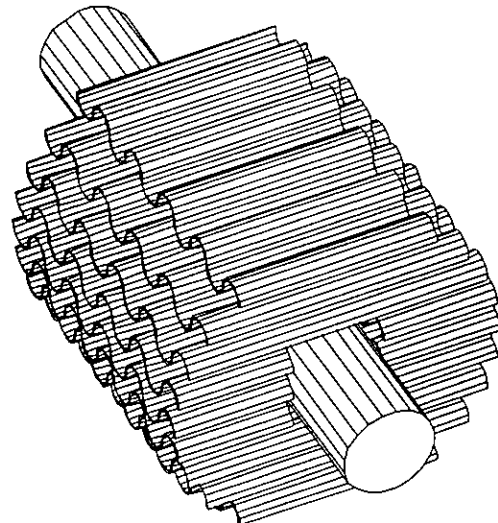
$$\rho_a = 172.33 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

Se observa que los corrugados propuestos para los discos aumentan la densidad de área de contacto pero también aumenta su costo de manufactura, sobre todo en los corrugados de tipo "arreglo triangular" y "arreglo circular".

Para la configuración de placas paralelas también se proponen placas lisas y corrugadas, donde los tipos de corrugados serían "triangular lineal", "arreglo triangular", "circular lineal" y "arreglo circular". Pero además, los corrugados lineales se pueden hacer paralelos y transversales al eje como se muestran en las siguientes figuras:



Corrugado paralelo al eje



Corrugado transversal al eje

Así, para la configuración de placas horizontales tenemos:

#### 8) Placas lisas

$$A_c = 2491.69 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 125 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

#### 9) Placas corrugadas (triangular lineal) paralelas al eje

$\theta$ ( $^\circ$ )	$A_c$ ( $\text{m}^2$ )	$\rho_a$ ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )
30	8167.43	409.67
60	4692.13	235.33
90	3435.91	172.33
120	2849.26	143.00
150	2574.39	129.00

#### 10) Placas corrugadas (triangular lineal) transversales al eje

Los resultados son los mismos que el caso anterior.

## 11) Placas corrugadas (arreglo triangular)

$\theta$ (°)	$A_c$ (m <sup>2</sup> )	$\rho_a$ (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
30	9627.13	483.00
60	4983.37	250.00
90	3523.78	176.67
120	2877.15	144.33
150	2579.58	129.33

## 12) Placas corrugadas (circular lineal) paralelas al eje

$$A_c = 3020.22 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 151.33 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

## 13) Placas corrugadas (circular lineal) transversales al eje

Los resultados son los mismos que el caso anterior.

## 14) Placas corrugadas (arreglo circular)

$$A_c = 3432.84 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 172.33 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

Para la configuración de paletas se proponen los mismos tipos de corrugado que en las placas horizontales, y al igual que en éstas, también se pueden hacer corrugados paralelos y transversales al eje. Se puede observar fácilmente que en este tipo de configuración se desperdicia mucho volumen de trabajo en las zonas más alejadas al eje. Además, el momento de inercia del sistema aumenta considerablemente respecto a las demás propuestas, por lo que la estructura sería mucho más robusta, aumentando en consecuencia, el costo de manufactura del equipo y la energía necesaria para mover al sistema.

Así, para la configuración de paletas tenemos:

## 15) Paletas lisas

$$A_c = 1251.58 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 62.67 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

## 16) Paletas corrugadas (triangular lineal) paralelas al eje

$\theta$ (°)	$A_c$ (m <sup>2</sup> )	$\rho_a$ (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
30	4101.62	205.67
60	2355.92	118.33
90	1725.34	86.67
120	1431.36	71.67
150	1292.88	65.00

## 17) Paletas corrugadas (triangular lineal) transversales al eje

Los resultados son los mismos que el caso anterior.

## 18) Paletas corrugadas (arreglo triangular)

Los resultados son los mismos que el caso anterior.

## 19) Paletas corrugadas (circular lineal) paralelas al eje

$$A_c = 1516.33 \text{ m}^2 \qquad \rho_a = 76 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

## 20) Paletas corrugadas (circular lineal) transversales al eje

Los resultados son los mismos que el caso anterior.

## 21) Paletas corrugadas (arreglo circular)

$$A_c = 1723.49 \text{ m}^2 \qquad \rho_a = 86.33 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

En la configuración de "polígonos concéntricos", primero se consideraron tubos concéntricos paralelos al eje del sistema; sin embargo, debido a la dificultad de fabricar tubos de tan diversos y caprichosos diámetros, se pensó en polígonos regulares de  $n$  lados. En este caso sus lados se deben unir de alguna manera, como puede ser por medio de pegamento, pero obviamente esto elevaría su costo de fabricación y mantenimiento.

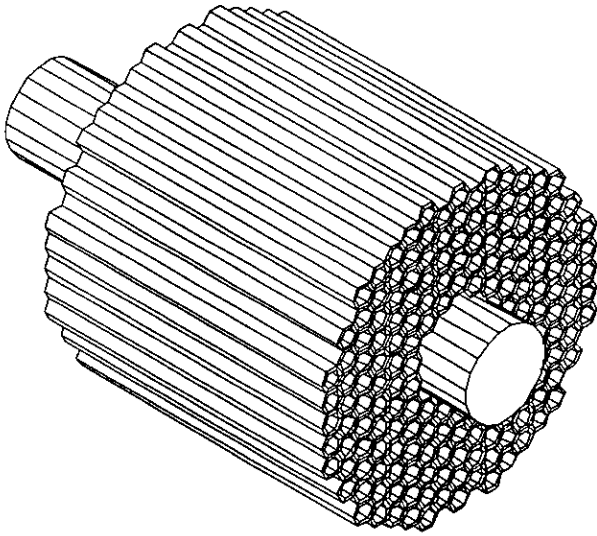
En esta configuración se propone colocar al sistema paralelo al flujo de agua residual para facilitar la entrada de ésta a los "tubos". Otra alternativa es fabricar tubos cortos y formar al sistema por módulos pequeños.

Para los cálculos del área de contacto y densidad de área se consideraron polígonos de varios lados, y finalmente circunferencias. Como no se debe sobrepasar el volumen de trabajo, el número de polígonos concéntricos ( $N_p$ ) no es constante.

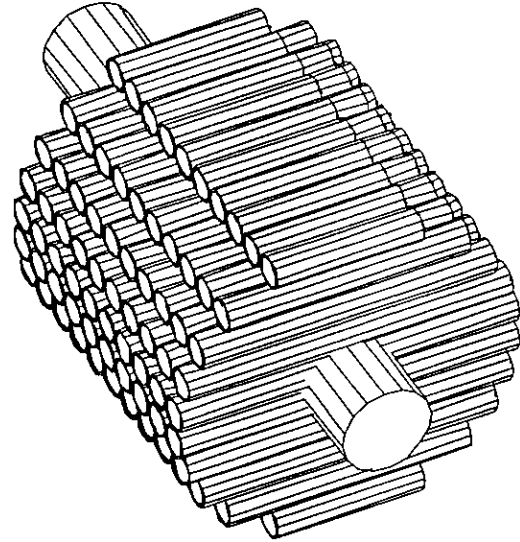
## 22) Polígonos concéntricos

$n$ (lados)	$N_p$ (polígonos)	$A_c$ (m <sup>2</sup> )	$\rho_a$ (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
3	40	1008.68	50.67
6	74	2033.75	102.00
9	81	2273.39	114.00
12	84	2387.59	119.67
15	85	2420.26	121.33
18	86	2462.35	123.67
21	86	2455.65	123.33
$\alpha$	88	2544.08	126.67

Los dos grupos restantes del conjunto de arreglos propuestos son tubos y ejes. De la misma forma que en los "corrugados lineales", en estas configuraciones se pueden colocar, tanto los tubos como los ejes, paralelos o transversales al eje como se muestra a continuación:



Tubos paralelos al eje



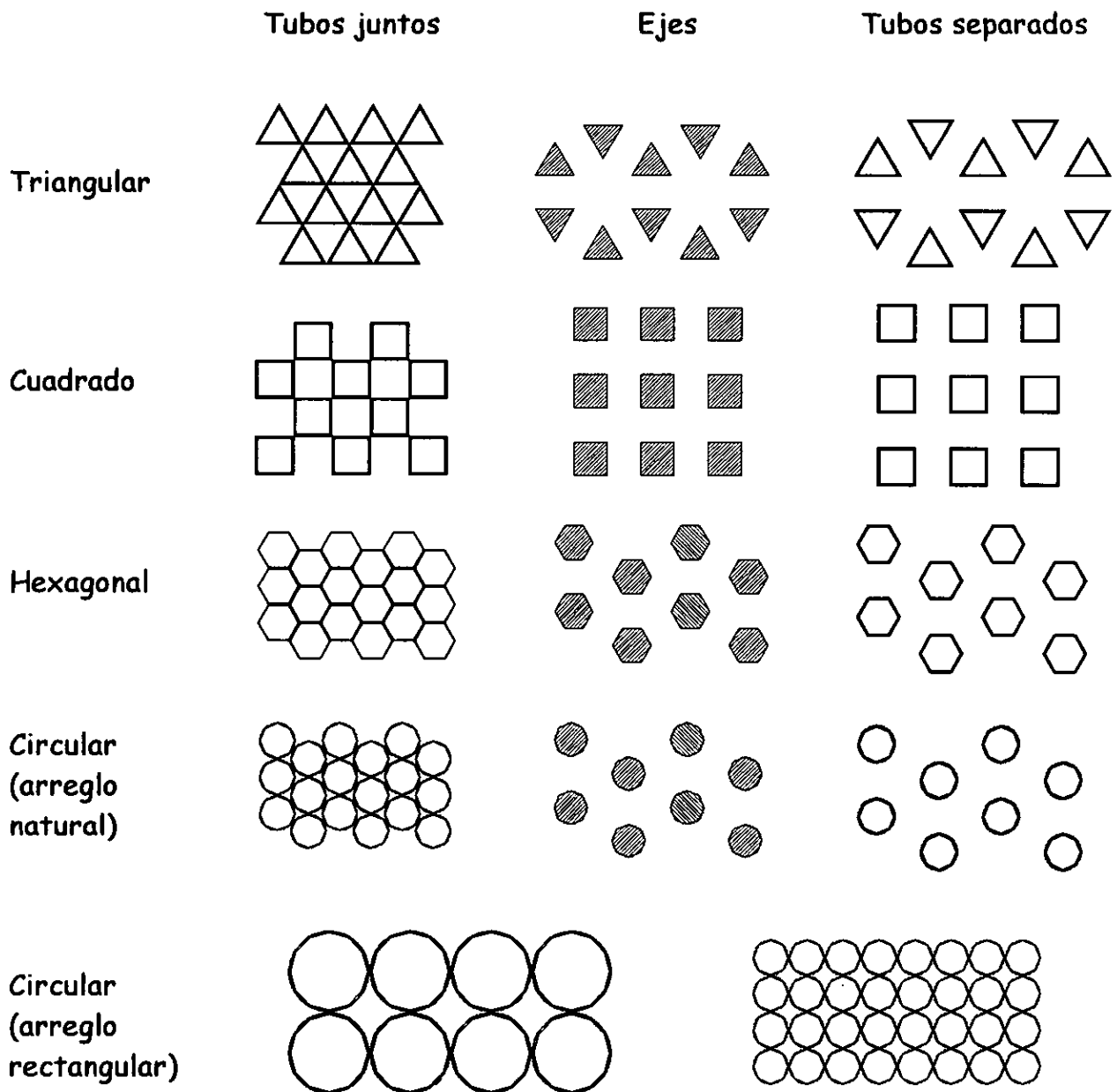
Tubos transversales al eje

Las variaciones que se hicieron consisten en considerar tubos y ejes triangulares, cuadrados, hexagonales y circulares; además, la disposición de los tubos puede ser juntos o separados como se muestra en la figura siguiente, la cual está dibujada a escala natural. Los ejes siempre se consideraron separados para aprovechar toda su superficie.

En los tubos triangulares y cuadrados siempre se consideró que los microorganismos habiten en ambos lados del tubo; no así, en los "hexagonales juntos" y en los circulares (arreglo natural), donde la biopelícula sólo existirá en el interior de los tubos.

Se puede observar que tanto los tubos, como los ejes circulares, se puede disponer en dos tipos de arreglos, el rectangular y el "natural", este último llamada así debido a que si dejamos "caer" arbitrariamente tubos circulares, la disposición final será de este tipo.

En los tubos circulares con un "arreglo rectangular", se pueden observar dos tipos, el primero de mayor tamaño que el segundo. En el primer caso, se considera que la biopelícula se alojará en ambos lados del tubo, por lo que se respeta la mínima distancia entre superficies en la parte exterior de los mismos, por lo que el diámetro de los tubos aumenta considerablemente; y en el segundo caso, se considera que los microorganismos sólo habitarán en el interior de los tubos.



A continuación se muestran los resultados obtenidos para estas configuraciones.

En cada caso, se calculó el área de contacto y la densidad de área, para las disposiciones de elementos paralelos al eje y transversales al eje:

23) Tubos triangulares juntos, por ambos lados (paralelos)

$$A_c = 6091.62 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 305.67 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

24) Tubos triangulares juntos, por ambos lados (transversales)

$$A_c = 5601.18 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 281 \text{ m}^2/\text{m}^3$$



25) Ejes triangulares (paralelos)

$$A_c = 1993.63 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 100 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

26) Ejes triangulares (transversales)

$$A_c = 1834.14 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 92 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

27) Tubos triangulares separados, por ambos lados (paralelos)

$$A_c = 3438.16 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 172.46 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

28) Tubos triangulares separados, por ambos lados (transversales)

$$A_c = 3163.1 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 158.66 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

29) Tubos cuadrados juntos, por ambos lados (paralelos)

$$A_c = 4414.96 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 221.33 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

30) Tubos cuadrados juntos, por ambos lados (transversales)

$$A_c = 4057.48 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 203.33 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

31) Ejes cuadrados (paralelos)

$$A_c = 1329.09 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 66.67 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

32) Ejes cuadrados (transversales)

$$A_c = 1222.26 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 61.33 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

33) Tubos cuadrados separados, por ambos lados (paralelos)

$$A_c = 2492.04 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 125 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

34) Tubos cuadrados separados, por ambos lados (transversales)

$$A_c = 2292.11 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 115 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

35) Tubos hexagonales juntos (paralelos)

$$A_c = 4672.57 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 234.33 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

36) Tubos hexagonales juntos (transversales)

$$A_c = 4286.82 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 215 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

37) Ejes hexagonales (paralelos)

$$A_c = 1329.09 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 66.67 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

**38) Ejes hexagonales (transversales)**

$$A_c = 1214.79 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 61 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

**39) Tubos hexagonales separados, por ambos lados (paralelos)**

$$A_c = 2492.04 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 125 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

**40) Tubos hexagonales separados, por ambos lados (transversales)**

$$A_c = 2279.84 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 114.33 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

**41) Tubos circulares juntos, arreglo natural (paralelos)**

$$A_c = 4237.55 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 212.67 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

**42) Tubos circulares juntos, arreglo natural (transversales)**

$$A_c = 3892.06 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 195.33 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

**43) Ejes circulares, arreglo natural (paralelos)**

$$A_c = 1205.35 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 60.33 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

**44) Ejes circulares, arreglo natural (transversales)**

$$A_c = 1106.44 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 55.33 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

**45) Tubos circulares separados, arreglo natural, por ambos lados (paralelos)**

$$A_c = 2260.03 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 113.33 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

**46) Tubos circulares separados, arreglo natural, por ambos lados (transversales)**

$$A_c = 2071.74 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 104 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

**47) Tubos circulares, arreglo rectangular, por ambos lados (paralelos)**

$$A_c = 3363.54 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 168.67 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

**48) Tubos circulares, arreglo rectangular, por ambos lados (transversales)**

$$A_c = 3093.51 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 155.33 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

**49) Tubos circulares, arreglo rectangular (paralelos)**

$$A_c = 3669.83 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 184 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

**50) Tubos circulares, arreglo rectangular (transversales)**

$$A_c = 3372.03 \text{ m}^2$$

$$\rho_a = 169 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

### 2.3 SELECCIÓN DEL MEDIO DE SOPORTE

Para determinar la geometría del medio de soporte fue necesario comparar los diferentes arreglos propuestos, por lo que se establecieron diversos criterios de selección, asignando a cada uno de ellos un porcentaje de la calificación final de acuerdo a su importancia. Posteriormente, se seleccionaron los arreglos que parecían satisfacer mejor los criterios establecidos para evaluarlos en una tabla de decisión. En esta tabla se les asignaron calificaciones del 0 al 10 en cada uno de los criterios, donde la calificación más alta corresponde a la alternativa que mejor lo satisface. Así, en una segunda tabla, se obtuvo la "puntuación final" de cada alternativa, multiplicando la calificación obtenida en cada criterio por su porcentaje correspondiente y sumando estos resultados. De esta forma se seleccionó el medio de soporte con mayor puntuación.

Los criterios de selección que se establecieron son los siguientes:

- Densidad de área de contacto (20%). Uno de los objetivos de este diseño es aumentar este parámetro por lo que en la tabla de decisión la calificación más alta corresponde a la geometría que ofrece mayor densidad de área superficial.
- Costos de fabricación (20%). En este criterio se consideraron tanto los costos de fabricación del medio de soporte como de la estructura. No se hizo ningún tipo de cotización, el criterio para evaluar cada alternativa consistió en determinar cualitativamente su dificultad de fabricación y el tipo de estructura requerida. Así, la calificación más alta indica que los costos de fabricación son menores.
- Facilidad de mantenimiento (20%). Se considera de igual importancia que los casos anteriores, ya que reparar o dar mantenimiento al equipo implica detener el proceso de purificación, por lo que el tiempo necesario para ello debe ser mínimo.
- Rigidez del medio de soporte (15%). Cuando se aplica una carga a un cuerpo, los esfuerzos que se generan son menores si el área de aplicación es mayor. Así, por ejemplo, en una barra es preferible tener una carga uniformemente distribuida que dos cargas puntuales. Si tenemos dos tubos horizontales, uno circular y otro hexagonal, apoyados en sus extremos, el área de apoyo en el circular se reduce a un punto de cada lado, mientras que en el hexagonal, apoyaría uno de sus lados. Bajo este criterio es preferible tener tubos hexagonales porque en los circulares habría una concentración de esfuerzos en los puntos de apoyo. De esta forma, este criterio evalúa la rigidez del medio de soporte por si mismo y la distribución de cargas en el material. Este parámetro es importante ya que con un medio de soporte rígido es posible disminuir los problemas estructurales del sistema.

- Velocidad de evacuación (15%). La eficiencia de purificación en un reactor biológico depende, entre otros factores, de una adecuada oxigenación. Este proceso se lleva a cabo, por acción natural, cuando el medio de soporte se encuentra al aire libre; sin embargo, es necesario que durante esta etapa la superficie del mismo no contenga agua, por lo que la velocidad de evacuación de la misma es un factor importante en el correcto funcionamiento del equipo.
- Turbulencia (10%). Cuando la biomasa excedente se desprende de la película de microorganismos por efecto de fuerzas cortantes, es necesario mantenerla en suspensión para que no se sedimente en el tanque y poder extraerla en un proceso posterior. Lo anterior se logra si las condiciones de turbulencia en el agua son adecuadas, además ésta también ayuda a disminuir la formación de cadenas de microorganismos; por lo que la calificación en este criterio será mayor si la turbulencia que se genera es mayor.

Una vez establecidos los criterios de selección con su correspondiente porcentaje de importancia, el siguiente paso es evaluar cada una de las alternativas generadas; sin embargo, tomando en cuenta la cantidad de éstas, se realizó un sondeo general para eliminar las superficies que a primera vista se quedan muy por debajo de las expectativas del diseño. Los criterios de eliminación son los siguientes:

- Se excluyen las configuraciones cuya densidad de área sea menor que  $150 \text{ m}^2/\text{m}^3$ .
- En todas aquellas superficies que involucran "corrugados triangulares" existe el riesgo de que en sus pliegues se formen acumulaciones de biomasa, por lo que quedan eliminadas
- Las superficies que tienen corrugados del tipo "arreglo circular" implican un costo de manufactura muy alto, mucho mayor que en los discos corrugados convencionales, por lo que no tiene ningún caso evaluarlas.
- En cuanto a las configuraciones de tubos y ejes propuestos, se excluyen todos los triangulares por las mismas razones que en los corrugados triangulares.
- También se excluyen de este grupo todas las configuraciones transversales al eje, ya que en todos los casos la densidad de área superficial es inferior que en las configuraciones paralelas al eje; además es mucho más fácil acomodar los tubos en este último caso.
- Por último, se eliminan los medios de soporte propuestos con tubos circulares en un "arreglo rectangular", ya que, al comparar con el "arreglo natural", la disposición del primero es mucho más difícil lograrla y la densidad de área superficial siempre es mayor en el segundo caso.

Es evidente que la opción de discos planos debe quedar fuera de la tabla de decisión, pero se conserva como referencia para comparar su evaluación con la de las demás. Así, las configuraciones que se evaluaron son:

1. Discos lisos	$\rho_a = 126$	$m^2/m^3$
5. Discos corrugados (circular lineal)	$\rho_a = 152$	$m^2/m^3$
12. Placas corrugadas (circular lineal) paralelas al eje	$\rho_a = 151$	$m^2/m^3$
29. Tubos cuadrados juntos, por ambos lados (paralelos)	$\rho_a = 221$	$m^2/m^3$
35. Tubos hexagonales juntos (paralelos)	$\rho_a = 234$	$m^2/m^3$
41. Tubos circulares juntos, arreglo natural (paralelos)	$\rho_a = 213$	$m^2/m^3$

A continuación se muestran las tablas de decisión obtenidas con estas configuraciones, así como la evaluación final de cada una de éstas.

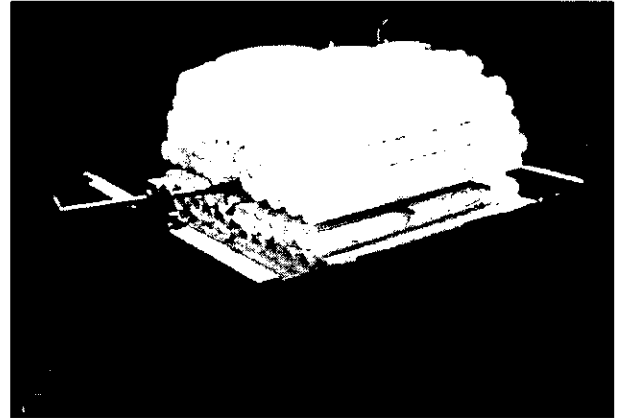
	1	5	12	29	35	41
Densidad de área de contacto	5	6	6	9	10	9
Costos de fabricación	6	3	4	8	7	9
Facilidad de mantenimiento	4	4	4	7	9	8
Rigidez del medio de soporte	9	9	5	5	8	6
Velocidad de evacuación	10	9	8	5	5	5
Turbulencia	2	5	4	8	8	8

	%	1	5	12	29	35	41
Densidad de área de contacto	20	1.0	1.2	1.2	1.8	2.0	1.8
Costos de fabricación	20	1.2	0.6	0.8	1.6	1.4	1.8
Facilidad de mantenimiento	20	0.8	0.8	0.8	1.4	1.8	1.6
Rigidez del medio de soporte	15	1.35	1.35	0.75	0.75	1.2	0.9
Velocidad de evacuación	15	1.5	1.35	1.2	0.75	0.75	0.75
Turbulencia	10	0.2	0.5	0.4	0.8	0.8	0.8
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>6.05</b>	<b>5.8</b>	<b>5.15</b>	<b>7.1</b>	<b>7.95</b>	<b>7.65</b>

Así, finalmente, se puede observar que las configuraciones de tubos obtuvieron las calificaciones más altas, ya que éstas ofrecen mayor densidad superficial, su costo de fabricación es menor y su mantenimiento es más sencillo. Sin embargo, ahora existe el problema de la velocidad de evacuación, ya que al utilizar tubos hexagonales como medio de soporte, éstos tardarán cierto tiempo en desalojar el agua que contienen una vez que salen a la superficie; además, existe la posibilidad de que los tubos no se llenen de agua al sumergirse. Para examinar lo anterior se construyó un modelo experimental, cuyas observaciones se exponen a continuación.

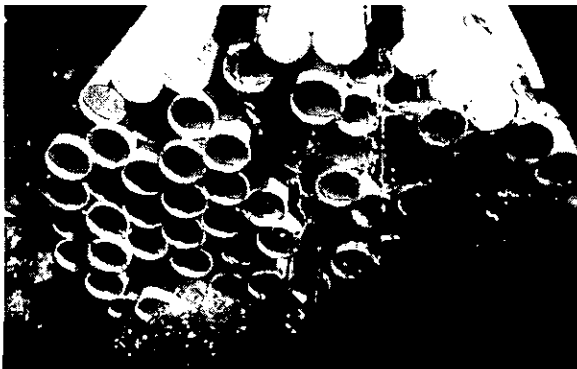
## 2.4 RESULTADOS DEL MODELO EXPERIMENTAL

El modelo experimental se construyó de 50 cm de diámetro y 75 cm de longitud aproximadamente, se utilizaron tubos circulares de PVC de 1 pulgada de diámetro dispuestos en un "arreglo natural"; también se colocaron algunas mangueras de plástico transparente con el propósito de observar si éstas se llenaban totalmente al sumergirse. La rotación se realizó manualmente.



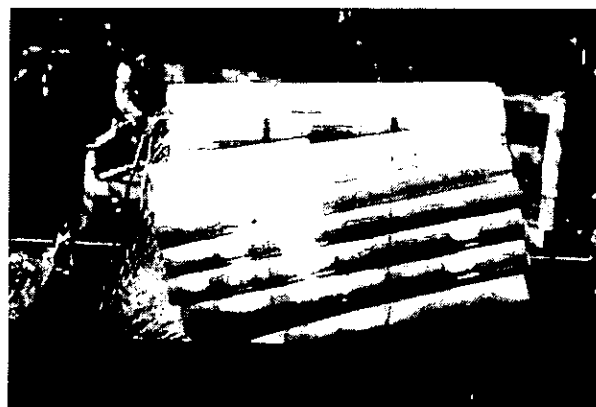
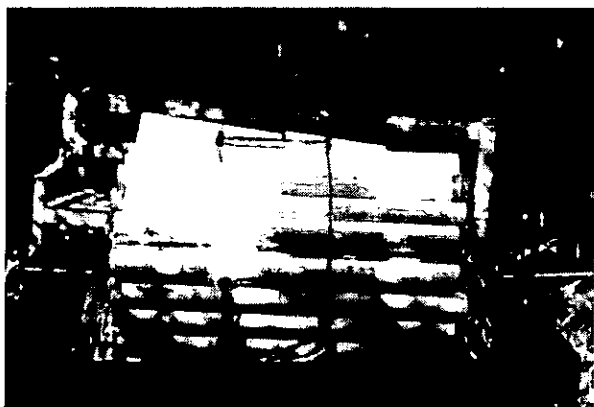
Se observó que cuando los tubos están horizontales, éstos se vacían hasta que han girado cierto ángulo después de salir a la superficie, dependiendo de la velocidad de rotación del sistema. Este arrastre de agua es perjudicial por dos razones; la primera, porque el agua contenida en los tubos que se encuentran al aire libre implica una carga más al sistema; y la segunda, porque el tiempo disponible para la oxigenación de los microorganismos disminuye, ya que estos pueden tomar el oxígeno del aire hasta que se encuentran en contacto con él. Por otro lado, los tubos no se vacían por completo, queda una pequeña capa de líquido en su interior (ver figura inferior) que gira con el sistema.

Se observó también que como el agua sale por ambos extremos, se dificulta la entrada de ésta a los tubos que se están sumergiendo en ese momento, por lo que algunos de ellos no se llenan por completo; es decir, quedan burbujas de aire en su interior.

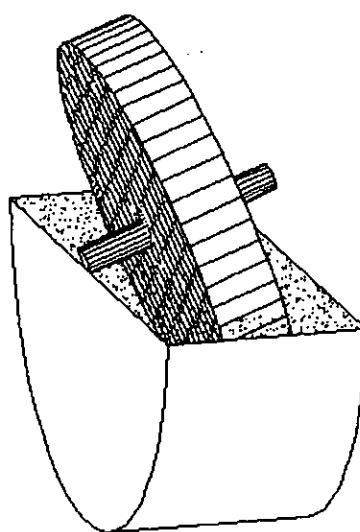
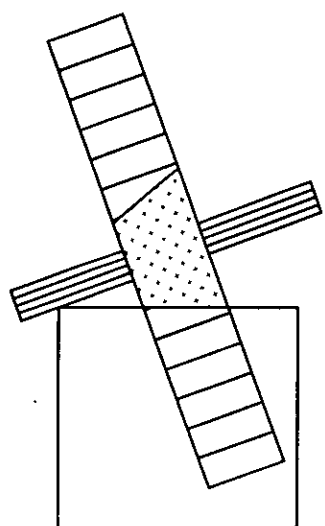


Para disminuir estos efectos se decidió inclinar el sistema cierto ángulo respecto a la horizontal. Así, se logró reducir el tiempo de arrastre del agua, se eliminó la capa de líquido remanente, y se evitó la formación de burbujas de aire en el interior de los tubos, ya que de esta forma, el agua sale por un lado del sistema y entra por el otro. Este fenómeno contribuye, además, a la mezcla de la biomasa desprendida con el agua residual.

En las figuras inferiores se muestra la salida de agua en un sistema horizontal y en uno inclinado 15° aproximadamente.



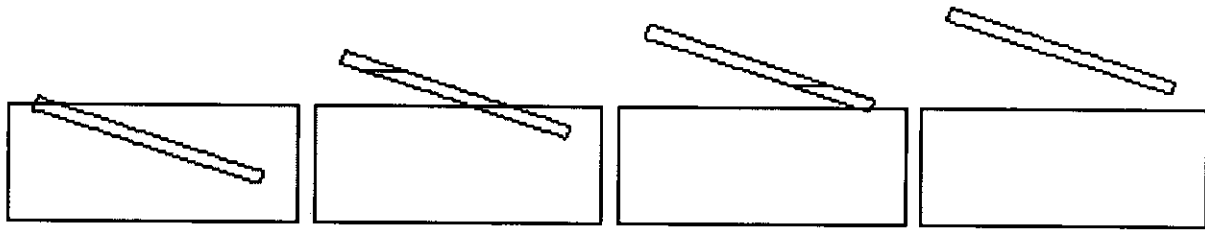
Evidentemente, la velocidad de evacuación aumenta al incrementar el ángulo de inclinación; sin embargo, al inclinar el sistema, cierta región cónica cercana al eje se desaprovecha pues el agua nunca llegará al interior de estos tubos (ver figura inferior). Así, el ángulo de inclinación debe ser lo más pequeño posible, pero suficiente para evacuar rápidamente el agua de los tubos y provocar un esfuerzo cortante adecuado sobre la biomasa.



## 2.5 INCLINACIÓN DEL SISTEMA Y GEOMETRÍA DEL MEDIO DE SOPORTE

El tiempo que tarda el agua en salir de los tubos depende de diferentes parámetros: la longitud de éstos, su velocidad tangencial y el ángulo de inclinación del sistema.

El agua empezará a salir de los tubos justo en el momento en que éstos salgan a la superficie; sin embargo, como se puede observar en la figura siguiente, la velocidad de evacuación no necesariamente es igual a la velocidad con la que salen los tubos del agua, por lo que cuando el tubo haya emergido completamente, aún contendrá agua.



El agua saldrá de los tubos debido a la diferencia de presiones entre sus extremos y a la acción de la gravedad, pero cuando el tubo ha salido por completo a la superficie, la diferencia de presiones es nula, ya que en ambos extremos tenemos actuando solamente a la presión atmosférica.

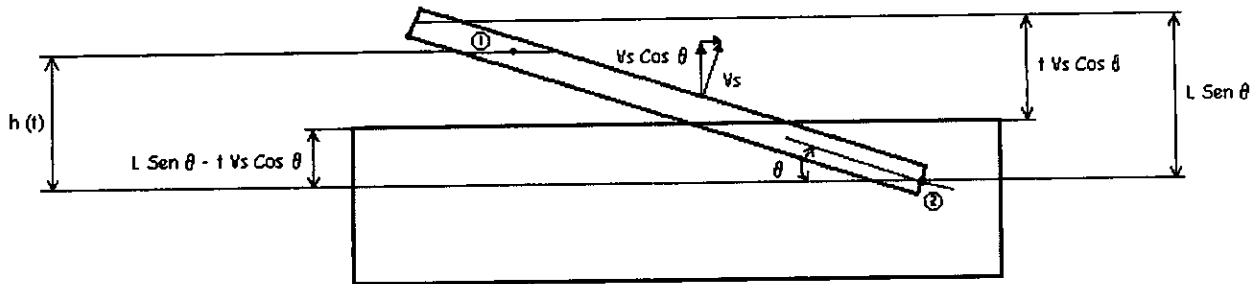
Así, para determinar el tiempo de evacuación es necesario analizar dos modelos: el primero, cuando el tubo aún se encuentra sumergido; es decir, cuando existe una diferencia de presiones entre sus extremos; y el segundo, cuando el tubo se encuentra completamente al aire libre. En el primer caso se determinará el tiempo que tarda el tubo en salir a la superficie y la altura de la columna de agua que aún queda en él; y en el segundo, el tiempo de desalojo del agua restante. De este modo el tiempo que tarda el agua en salir de los tubos será la suma de los tiempos calculados en ambos modelos.

En ambos modelos se consideran las siguientes variables (ver siguiente figura):

- Longitud de los tubos =  $L$
- Velocidad tangencial del sistema en la periferia =  $V_s = 30 \text{ m/min}$
- Ángulo de inclinación del sistema =  $\theta$
- Gravedad =  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$
- Altura de la columna de agua que contiene el tubo =  $h(t)$
- Tiempo que tarda el tubo en salir a la superficie =  $t_i$
- Variación de  $h(t)$  cuando el tubo ha salido a la superficie =  $h'(t_i) = G$
- Columna de agua remanente cuando el tubo ha salido a la superficie =  $h(t_i) = H$
- Tiempo total de desalojo =  $t_T$



En la siguiente figura se ilustra la posición de un tubo, en un tiempo arbitrario, cuando aún no ha salido del tanque por completo (primer modelo).



De la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gZ_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gZ_2$$

$$P_1 = P_{atm}$$

$$V_1 = 0$$

$$Z_1 = h_2 + h(t)$$

$$P_2 = \rho g(L \text{ Sen } \theta - t V_s \text{ Cos } \theta) + P_{atm}$$

$$V_2 = V_2$$

$$Z_2 = h_2$$

$$\Rightarrow \frac{P_{atm}}{\rho} + g[h_2 + h(t)] = \frac{P_{atm}}{\rho} + g(L \text{ Sen } \theta - t V_s \text{ Cos } \theta) + \frac{V_2^2}{2} + gh_2$$

$$\Rightarrow V_2 = \sqrt{2g[h(t) - (L \text{ Sen } \theta - t V_s \text{ Cos } \theta)]}$$

$$\frac{dVol}{dt} = \frac{d}{dt} \left[ \frac{A_T h(t)}{\text{Sen } \theta} \right] = \frac{A_T}{\text{Sen } \theta} \left[ \frac{dh(t)}{dt} \right] = A_T V_2$$

$$\Rightarrow V_2 = \frac{1}{\text{Sen } \theta} \left[ \frac{dh}{dt} \right]$$

$$\Rightarrow \left[ \frac{dh}{dt} \right]^2 = 2g \text{ Sen}^2 \theta [h - L \text{ Sen } \theta + t V_s \text{ Cos } \theta]$$

Sean:  $A = g \text{ Sen}^2 \theta$        $B = V_s \text{ Cos } \theta$        $C = L \text{ Sen } \theta$        $x(t) = \frac{dh}{dt}$

$$\Rightarrow [x(t)]^2 = 2A[h(t) - C + B t] \text{----- (1)}$$

Derivando: 
$$2x \frac{dx}{dt} = 2A \left[ \frac{dh}{dt} + B \right]$$

$$\Rightarrow x \frac{dx}{dt} = A(x + B)$$

Separando variables: 
$$\frac{x dx}{A(x + B)} = dt$$

Integrando: 
$$t + k = \frac{1}{A} [B + x - B \ln(Ax + AB)]$$

En  $t = 0$ ,  $x = \frac{dh}{dt} = 0 \Rightarrow k = \frac{1}{A} [B - B \ln(AB)]$

$$\Rightarrow t = \frac{1}{A} \left\langle x - B [\ln(Ax + AB) - \ln(AB)] \right\rangle = \frac{1}{A} \left[ x - B \ln \left( \frac{x+B}{B} \right) \right]$$

$$\Rightarrow At = x - B \ln \left( \frac{x}{B} + 1 \right) \text{------(2)}$$

El tubo ha salido por completo del agua cuando:  $tV_s \cos \theta = L \text{Sen} \theta$

$$\Rightarrow t_i = \frac{L \text{Sen} \theta}{V_s \cos \theta} = \frac{C}{B} \text{------(3)}$$

y  $\frac{dh}{dt} = x = G$ ,  $h(t) = H$

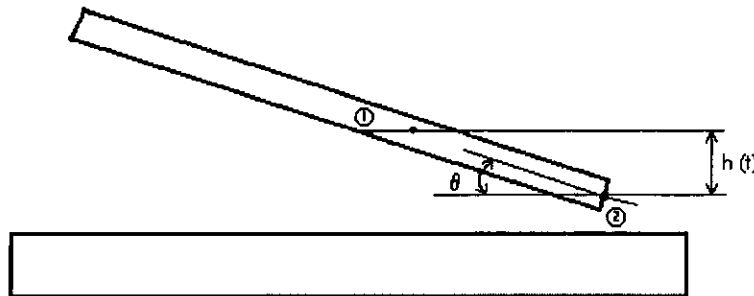
Sustituyendo en la ecuación 2 queda:

$$\frac{AC}{B} = G - B \ln \left( \frac{G}{B} + 1 \right) \text{------(4)}$$

Sustituyendo en la ecuación 1 queda:

$$G^2 = 2AH \Rightarrow H = \frac{G^2}{2A} \text{------(5)}$$

En la siguiente figura se ilustra la posición de un tubo, en un tiempo arbitrario, cuando ya ha salido del tanque por completo (segundo modelo).



De la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gZ_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gZ_2 \quad \Rightarrow \quad V_2 = \sqrt{2g[h(t)]}$$

$$\frac{dVol}{dt} = \frac{d}{dt} \left[ \frac{A_T h(t)}{\text{Sen}\theta} \right] = \frac{A_T}{\text{Sen}\theta} \left[ \frac{dh(t)}{dt} \right] = A_T V_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{dh}{dt} = V_2 \text{Sen}\theta$$

$$\Rightarrow \quad \left[ \frac{dh}{dt} \right]^2 = 2g \text{Sen}^2\theta h$$

Derivando:

$$2 \left[ \frac{dh}{dt} \right] \left[ \frac{d^2h}{dt^2} \right] = 2g \text{Sen}^2\theta \frac{dh}{dt} \quad \Rightarrow \quad \frac{d^2h}{dt^2} = g \text{Sen}^2\theta = A$$

Integrando y considerando que en  $t = 0$ ,  $\frac{dh}{dt} = G$ :  $\frac{dh}{dt} = At + G$

Integrando y considerando que en  $t = 0$ ,  $h = H$ :  $h(t) = \frac{At^2}{2} + Gt + H$

Sustituyendo H de la ecuacion 5 queda:  $h(t) = \frac{At^2}{2} + Gt + \frac{G^2}{2A}$

El agua ha salido por completo cuando  $h(t) = 0$   $0 = \frac{At^2}{2} + Gt + \frac{G^2}{2A}$

$$\Rightarrow \quad t^2 + 2 \frac{G}{A} t + \left( \frac{G}{A} \right)^2 = 0 \quad \Rightarrow \quad \left[ t + \frac{G}{A} \right]^2 = 0 \quad \Rightarrow \quad t = -\frac{G}{A}$$

Por lo tanto el tiempo total de desalojo es:  $t_T = t_i + \left(-\frac{G}{A}\right)$

Sustituyendo  $t_i$  de la ecuacion 3 queda:  $t_T = \frac{C}{B} - \frac{G}{A}$

Despejando  $G$ :  $G = \frac{AC}{B} - At_T$

Sustituyendo  $G$  en la ecuacion 4 queda:

$$\frac{AC}{B} = \frac{AC}{B} - At_T - B \operatorname{Ln} \left[ \frac{1}{B} \left( \frac{AC}{B} - At_T \right) + 1 \right]$$

$$\Rightarrow B \operatorname{Ln} \left( \frac{AC}{B^2} - \frac{A}{B} t_T + 1 \right) = -At_T$$

$$\Rightarrow \frac{AC}{B^2} - \frac{A}{B} t_T + 1 = e^{-\frac{A}{B} t_T}$$

$$\Rightarrow C = \frac{B^2}{A} \left[ \frac{A}{B} t_T - 1 + e^{-\frac{A}{B} t_T} \right]$$

$$\Rightarrow C = B t_T + \frac{B^2}{A} \left[ e^{-\frac{A}{B} t_T} - 1 \right]$$

Sustituyendo  $A, B$  y  $C$  queda:

$$L \operatorname{Sen} \theta = V_S \operatorname{Cos} \theta t_T + \frac{V_S^2 \operatorname{Cos}^2 \theta}{g \operatorname{Sen}^2 \theta} \left[ e^{-\frac{-g \operatorname{Sen}^2 \theta t_T}{V_S \operatorname{Cos} \theta}} - 1 \right]$$

Despejando  $L$  queda:

$$L = \frac{V_S t_T}{\operatorname{Tan} \theta} + \frac{V_S^2}{g \operatorname{Sen} \theta \operatorname{Tan}^2 \theta} \left[ e^{-\frac{-g \operatorname{Sen} \theta \operatorname{Tan} \theta t_T}{V_S}} - 1 \right]$$

Pero  $V_S$  es la velocidad tangencial del sistema en la periferia,

$$\Rightarrow V_S = 30 \frac{\text{m}}{\text{min}} = 0.5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{y} \quad g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

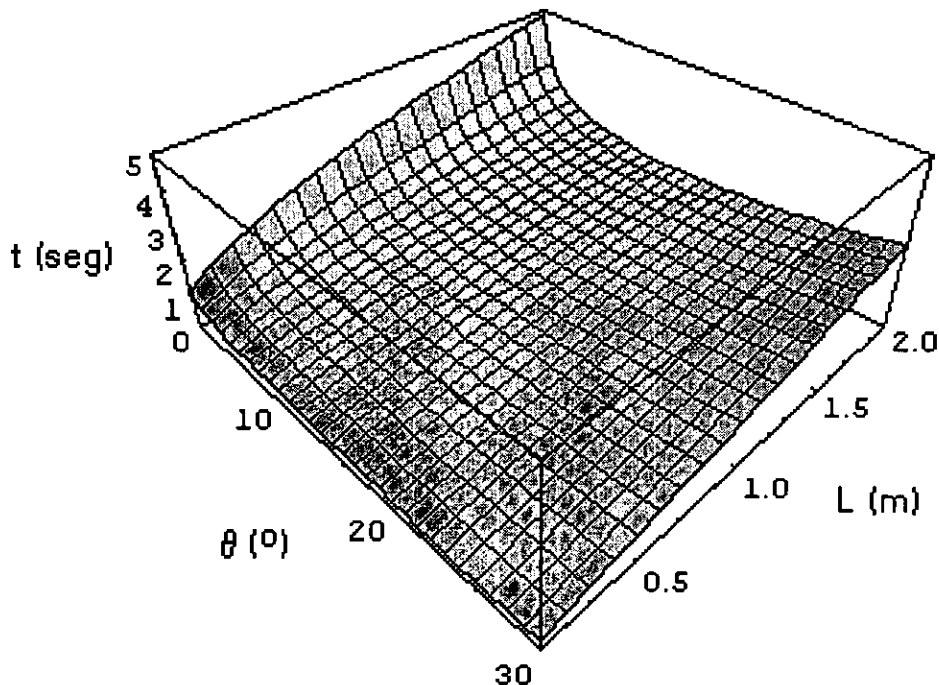
$$\Rightarrow L = \frac{t_T}{2 \operatorname{Tan} \theta} + \frac{1}{39.24 \operatorname{Sen} \theta \operatorname{Tan}^2 \theta} \left[ e^{-19.62 \operatorname{Sen} \theta \operatorname{Tan} \theta t_T} - 1 \right] \text{----- (6)}$$

Finalmente, se tiene una función implícita,  $t_T = f(L, \theta)$ , en la cual, al proponer la longitud de los tubos,  $L$ , y el ángulo de inclinación del sistema,  $\theta$ , es posible encontrar el tiempo total de desalojo,  $t_T$ , a través de un método numérico iterativo. Para graficar la función mencionada se realizó un programa en Mathematica™, donde  $L$  varía desde 0.1 m hasta 2 m; y  $\theta$ , desde  $1^\circ$  hasta  $30^\circ$ . En este programa se utiliza el comando "FindRoot", que hace una aproximación numérica, por medio del método de Newton-Raphson, para encontrar la solución. A continuación se muestran los resultados obtenidos:

```

ClearAll [L, t, a]
T = Array [t, {20, 30} ] ;
Do [t [n, m] = 0, {n, 1, 20, 1}, {m, 1, 30, 1} ] ;
For [n = 1, n <= 20, n++,
  For [m = 1, m <= 30, m++,
    a = m ;
    L = n/10 ;
    f [t] = FindRoot [ L == (0.5 * t / Tan [a * Degree] ) +
      (( 1 / ( 39.24 * ( Tan [a * Degree] )^2 * Sin [a * Degree] ) )
      ( Exp [-19.62 * t * Sin [a * Degree] * Tan [a * Degree] ] -1 ) ) ,
      {t, 0.1} ] ;
    t [n, m] = t / . f [t] ] ]
ListPlot3D [ T, PlotRange -> { { 1, 30 } , { 1, 20 } , { 0, 5 } } ,
  ViewPoint -> { 1, -1, 1 } ] ;

```



En la gráfica se puede observar que a medida que aumenta la longitud de los tubos, también aumenta el tiempo de desalojo del agua, como era de esperarse; sin embargo, también se esperaba que conforme aumentara el ángulo de inclinación disminuyera el tiempo de desalojo, lo que no es del todo cierto: a partir de aproximadamente  $10^\circ$  ocurre lo contrario, ya que entre más inclinados se encuentren los tubos, más tardarán en salir a la superficie, y la diferencia de presiones impide que el agua salga más rápido. De esta forma, es conveniente que el ángulo de inclinación no sea mayor que  $10^\circ$ .

Antes de definir la longitud de los tubos y el ángulo de inclinación es conveniente especificar el diámetro del sistema y su velocidad de rotación.

Se propone que el reactor biológico con tubos hexagonales como medio de soporte, al igual que en los biodiscos, se sumerja un 50% en el tanque y tenga un diámetro de 3.30 m. Entonces, considerando que la velocidad tangencial en la periferia debe ser de 30 m/min, la velocidad de rotación es:

$$V_T = \omega R \quad \Rightarrow \quad \omega = \frac{V_T}{R} \quad V_T = 30 \frac{\text{m}}{\text{min}} = 0.5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad R = 1.65 \text{ m}$$

$$\Rightarrow \quad \omega = \frac{0.5}{1.65} \left( \frac{\text{rad}}{\text{seg}} \right) \left( \frac{60 \text{ seg}}{\text{min}} \right) \left( \frac{\text{rev}}{2\pi \text{ rad}} \right) \approx 3 \text{ RPM}$$

Así, los tubos estarán expuestos al aire del ambiente durante 10 segundos en cada vuelta. Por lo tanto, se propone que el tiempo de desalojo del agua no sea mayor que un segundo.

Sustituyendo en la ecuación 6 una longitud de 0.65 m y un ángulo de  $10^\circ$  se verifica que el tiempo de desalojo es de aproximadamente 0.96 segundos, por lo que de acuerdo a los parámetros propuestos éstas magnitudes son adecuadas y definitivas.

Ahora interesa conocer la magnitud del esfuerzo cortante sobre la biopelícula con estos parámetros. Para establecer una comparación con el resultado obtenido para los tubos se determina primero el esfuerzo cortante que se produce para el caso de biodiscos. Para lo anterior se considera:

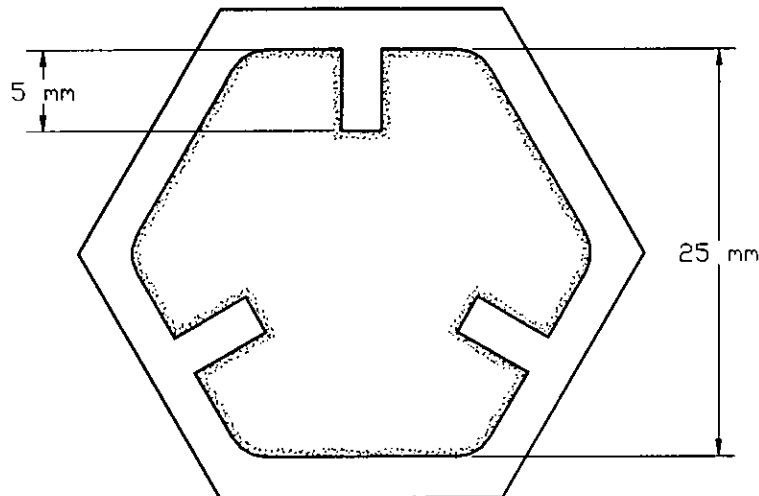
- Viscosidad del agua =  $\mu = 1 \times 10^{-3} \text{ kg/ms}$
- Velocidad del agua entre superficies =  $V$
- Distancia entre superficies =  $S$
- Esfuerzo cortante =  $\tau$

$$\text{Para biodiscos: } V = 30 \frac{\text{m}}{\text{min}} = 0.5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad S = 0.015 \text{ m} \quad \Rightarrow \quad \tau = \frac{\mu V}{S} = \frac{1}{30} \text{ Pa}$$

$$\text{Para tubos: } V = \frac{L}{t} = \frac{0.65 \text{ m}}{0.96 \text{ s}} = 0.68 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \tau = \frac{1}{30} \text{ Pa} \quad \Rightarrow \quad S = \frac{\mu V}{\tau} \approx 0.02 \text{ m}$$

Como se puede observar, para conservar el mismo esfuerzo cortante que en los biodiscos es necesario que la separación entre superficies sea de 20 mm; sin embargo, se mencionó en el capítulo anterior que la biomasa tiende a formar cadenas. En el caso de discos, estas cadenas no alteran en gran medida el funcionamiento del sistema, excepto cuando éstas forman puentes entre los discos y obstruyen el paso adecuado del agua, pero los puentes se forman cuando uno de los extremos de las cadenas se adhieren a la superficie de un disco adyacente y debido a que las cadenas caen por su propio peso este mecanismo ocurre con poca frecuencia. En el caso de los tubos la formación de cadenas sería altamente perjudicial, ya que los puentes se producirían con mayor facilidad y tapanían por completo los extremos de los tubos. Tomando en cuenta lo anterior, se consideró que la separación entre las superficies internas de los tubos debía incrementarse hasta 25 mm con la finalidad de disminuir la tendencia de la biomasa a la formación de puentes. Obviamente, esta consideración implica una disminución en la magnitud del esfuerzo cortante, que depende en forma inversa de la separación entre superficies, y una reducción en la densidad del área de contacto del sistema.

Para contrarrestar estas desventajas se optó por modificar la geometría interna de los tubos respetando las dimensiones propuestas. Esta modificación consiste en añadir pequeñas lengüetas de 5 mm de longitud que se extienden a todo lo largo de los tubos, como se muestra en la siguiente figura. Con esta pequeña variante en la geometría de los tubos se garantiza que el esfuerzo cortante se mantenga dentro de un rango óptimo, al mismo tiempo que se incrementa la densidad de área de contacto, impidiendo que esta última decaiga a consecuencia del incremento en la separación de las superficies internas de los tubos.







## *III Diseño Estructural*

### 3.1 DISEÑO CONCEPTUAL

El medio de soporte del reactor biológico giratorio que se propone está formado por un conjunto de aproximadamente 12 mil tubos de sección hexagonal, acomodados en forma paralela al eje, en un volumen de trabajo de 3.30 m de diámetro, 0.65 m de longitud y con un ángulo de inclinación de 10° respecto a la horizontal.

Ahora surgen las siguientes preguntas:

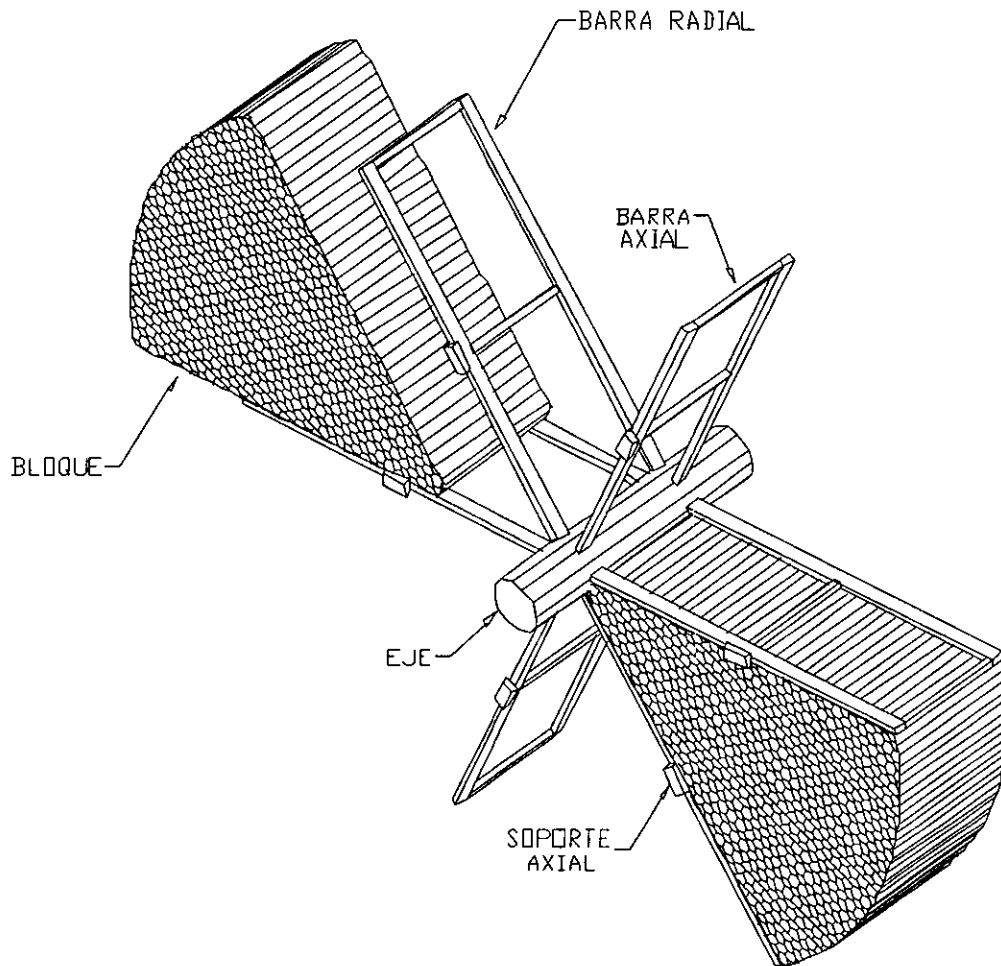
- ¿cómo acomodar, sin bloquear las entradas, 12 mil tubos de manera que formen un cilindro de 5.6 m<sup>3</sup> girando a 3 RPM?
- ¿cómo ensamblarlos?
- ¿cómo debe ser la estructura para soportarlos?
- ¿cuáles son las cargas que deben soportar los tubos y cada uno de los elementos de la estructura?
- ¿cuánta energía se requiere para mover el equipo?
- ¿qué densidad de área ofrece este nuevo reactor?
- ¿cómo se debe desmontar el equipo en caso de requerir una reparación mayor?
- ¿se han logrado disminuir los costos de fabricación y mantenimiento del equipo?
- ¿qué ventajas y desventajas tiene este nuevo sistema de purificación respecto a los equipos comerciales?

En lo que resta de este trabajo se discutirán brevemente las respuestas a estas interrogantes; sin embargo, como en cualquier problema de diseño, las respuestas no son únicas, existe una gran cantidad de diseños aceptables y esto no implica que algunos de ellos no sean válidos, pero siempre es posible encontrar alternativas más simples, menos costosas y que impliquen menor riesgo para sus operarios.

Antes de definir el diseño conceptual de la estructura es necesario considerar las funciones que debe cumplir:

- contener a los tubos que conforman la superficie de contacto,
- impedir el movimiento relativo entre ellos,
- soportar el peso de todo el sistema,
- impedir que los tubos resbalen axialmente debido a la inclinación del equipo,
- transmitir el movimiento eficientemente, y
- facilitar el ensamble de los tubos.

Para facilitar el ensamble de los tubos y la transmisión del movimiento al sistema se decidió dividir el volumen de trabajo en seis secciones tal como se muestra en la figura siguiente.



Así, la estructura que se propone está constituida por dos juegos de seis barras radiales, con un ángulo de  $60^\circ$  entre sí, colocados en cada extremo del eje; y las barras axiales que unen los dos conjuntos de barras radiales.

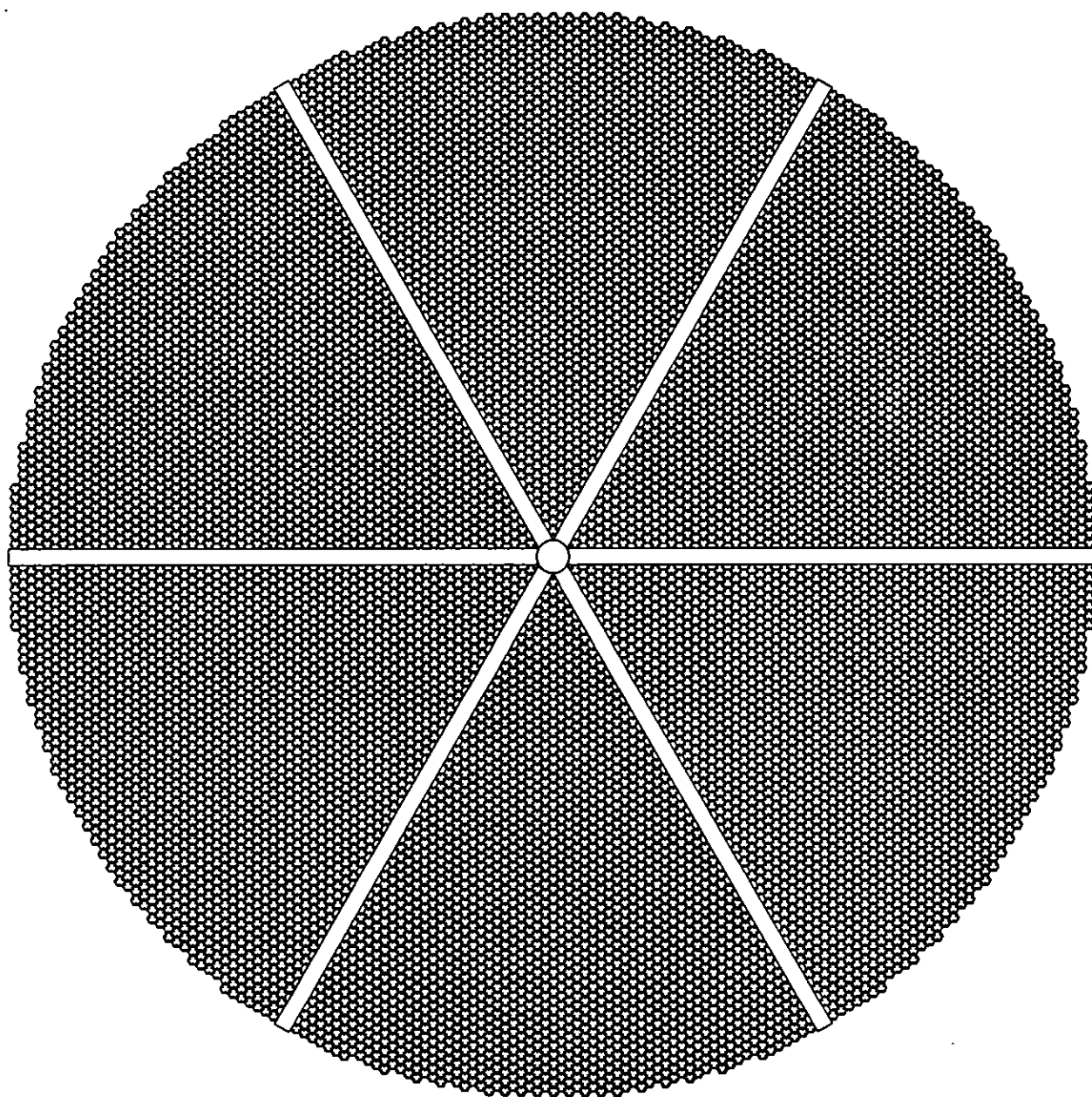
Sobre cada una de estas secciones se deberá colocar un bloque de tubos de la misma forma y tamaño que éstas. Para facilitar el manejo de estos bloques se propone acomodar y unir previamente los tubos que lo constituyen (más adelante se discute este procedimiento).

Finalmente, para soportar la carga axial de los bloques, debido a la inclinación del sistema, se colocan "soportes axiales" en cada una de las barras radiales de un extremo del eje.

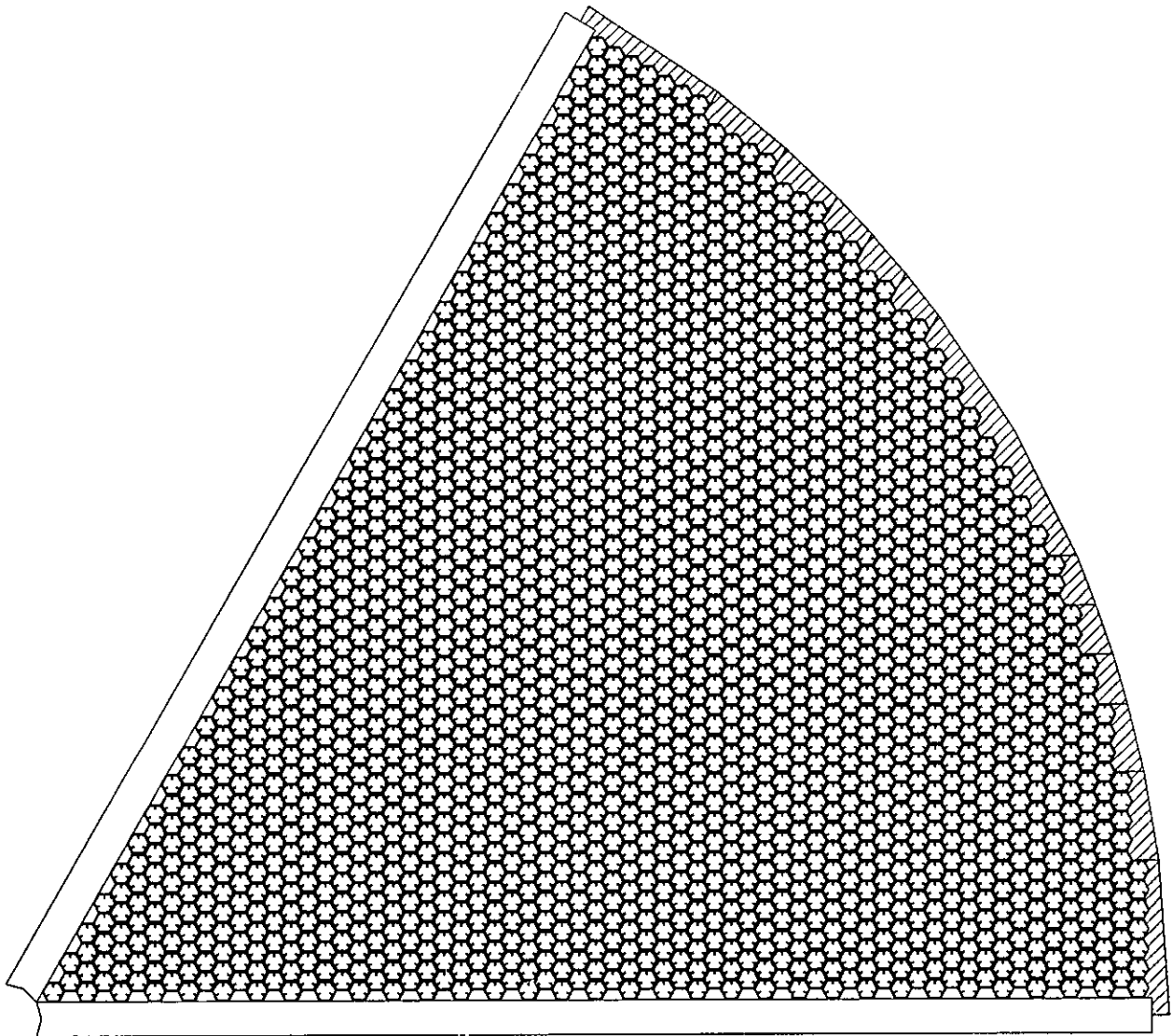
Ahora es necesario definir la manera como se mantendrán dichos bloques en las secciones descritas anteriormente; es decir, se requiere colocar algún elemento en la periferia del volumen de trabajo para contener los tubos.

Una de las alternativas que se plantea es rodear al "cilindro de tubos" con un cable de acero del calibre adecuado en cada uno de sus extremos; sin embargo, como se puede observar en la siguiente figura, la periferia es muy irregular y el cable sólo apoyaría en unos cuantos tubos, provocando con esto una concentración de esfuerzos en los mismos, por lo que su espesor tendría que aumentar considerablemente. Esto provocaría la disminución del número de tubos en el volumen de trabajo y en consecuencia la del área de contacto del sistema.

Además, para garantizar que no exista movimiento relativo entre los tubos, el cable tendría que mantenerse lo suficientemente tenso durante el funcionamiento del equipo para asegurar que el medio de soporte permanezca en su sitio.



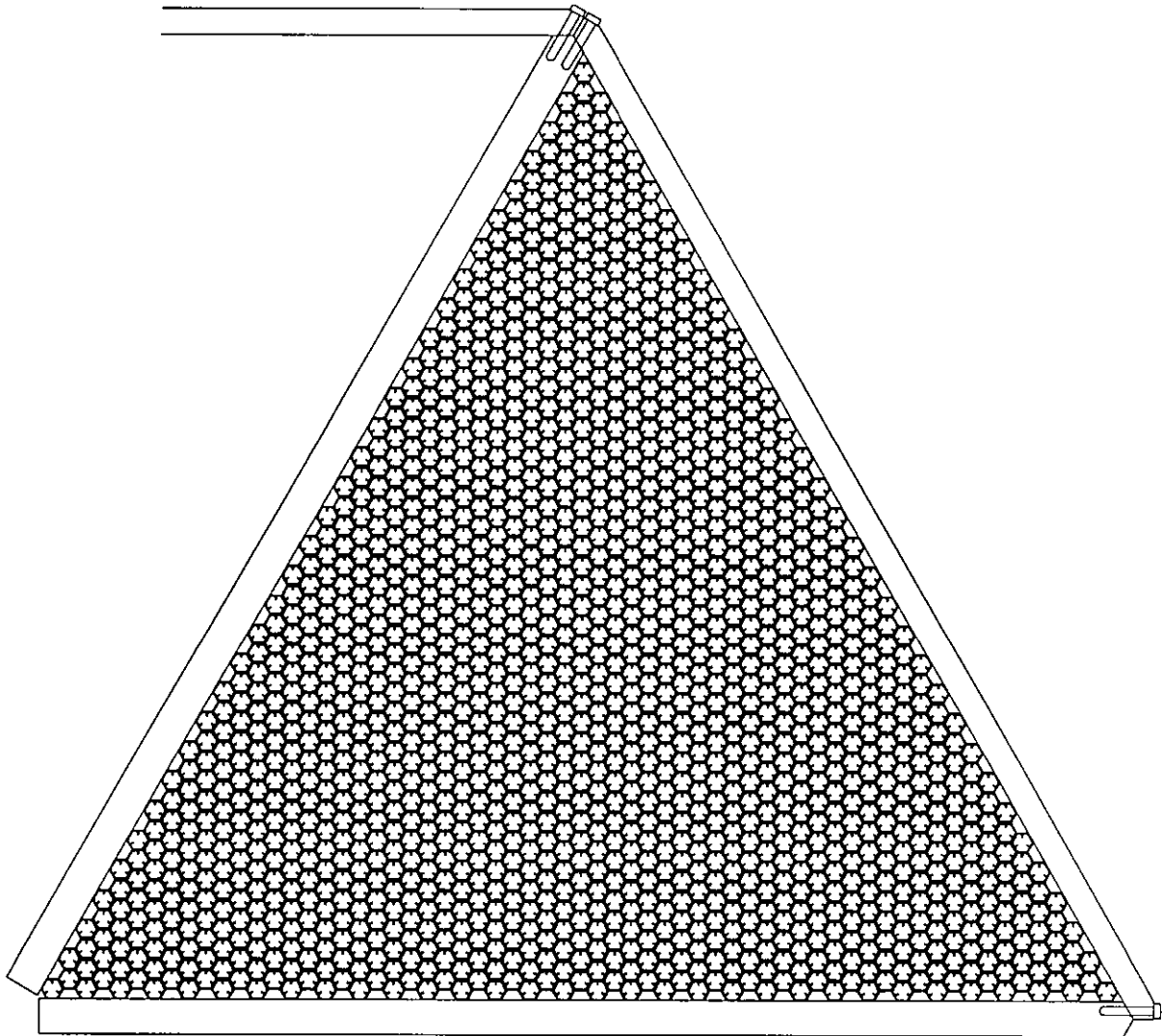
En la siguiente figura se muestra una de las seis secciones del volumen de trabajo, donde se aprecia mejor lo complicado que sería diseñar un dispositivo que contenga a los tubos y permita que éstos apoyen uniformemente para garantizar un equilibrio entre los esfuerzos generados.



Otra opción sería fabricar piezas del mismo material del medio de soporte (polietileno de alta densidad) que se adapten a la geometría de los tubos que se encuentran en la periferia y a la forma circular del volumen de trabajo, de modo que pueda colocarse sobre estas piezas, el cable de acero que sujete a todo el sistema.

De esta forma, se requeriría diseñar sólo seis o siete tipos distintos de piezas, cuya geometría se puede apreciar en la figura anterior; sin embargo, para generarlas se requeriría diseñar y manufacturar los moldes correspondientes y esto elevaría considerablemente los costos de fabricación del equipo, por lo que esta alternativa no se considera óptima.

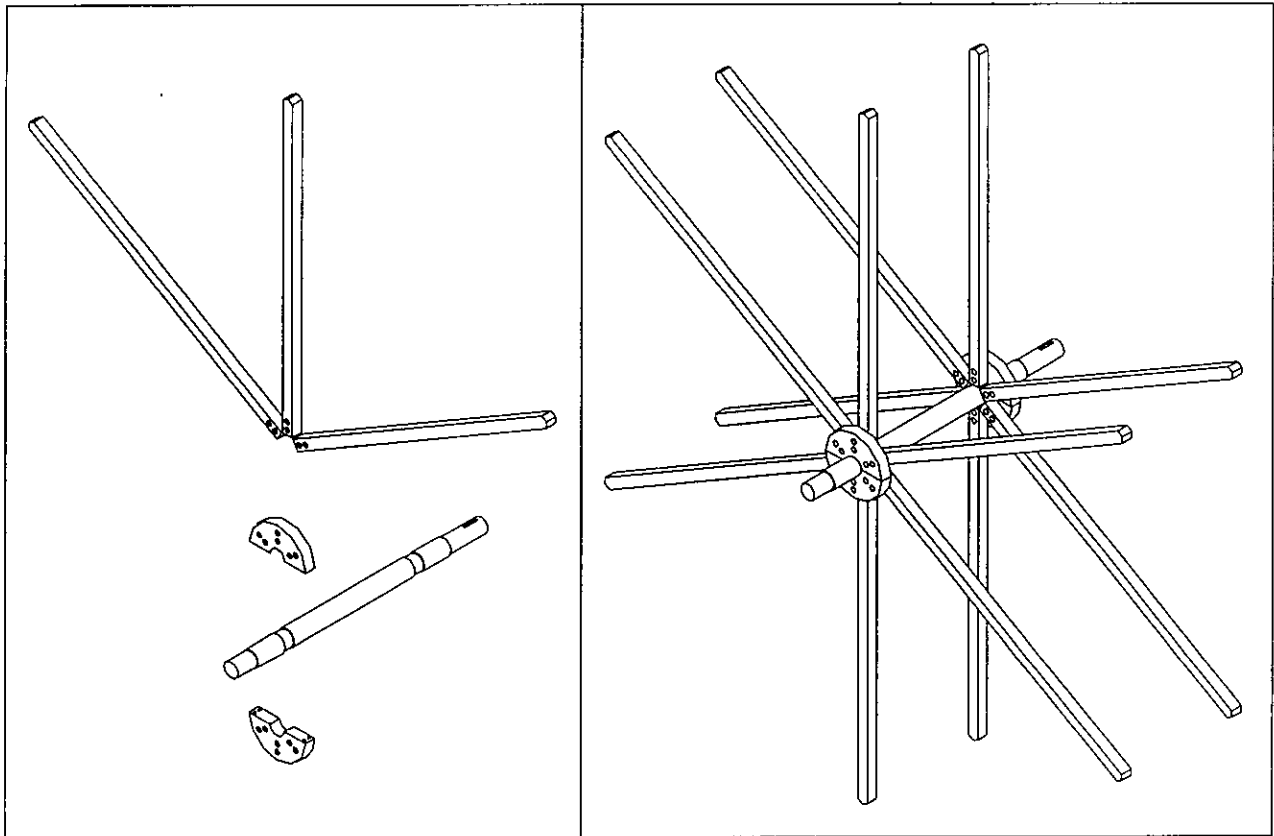
Por lo expuesto anteriormente se decidió modificar la geometría del sistema, cambiando la sección circular por una hexagonal, como se muestra a continuación. Así, el "cinturón" que debe contener al medio de soporte se reduce a seis elementos, que se pueden fijar a las barras radiales por medio de tornillos, donde todos los tubos que se encuentran en la periferia apoyan completamente.



De esta forma se logra contener a los tubos, garantizando que no existe movimiento relativo entre ellos y que los esfuerzos se distribuyen uniformemente en la estructura del sistema. Además, con esta modificación, se facilita el ensamble de los bloques de tubos, ya que únicamente es necesario colocarlos en la sección correspondiente y asegurarlos con el cinturón.

Por supuesto este cambio trae consigo algunas desventajas: como la reducción en el número de tubos y por consiguiente la del área de contacto; además, aumenta el momento de inercia del sistema, por lo que para iniciar el movimiento se requerirá más energía. Sin embargo, los beneficios logrados justifican estas desventajas.

Hasta ahora no se ha discutido el método para fijar las "barras radiales" al eje. La primera opción que se consideró fue unir estas piezas por medio de soldadura, ya sea manufacturando las secciones del eje, donde deben apoyar las barras radiales, en forma hexagonal; o los extremos de dichas barras en forma cilíndrica de modo que se adapten a la forma del eje; sin embargo, la soldadura complica el ensamble y transporte del equipo, por lo que se decidió diseñar un acoplamiento que permita unir estas piezas por medio de tornillos como se muestra en la siguiente figura.

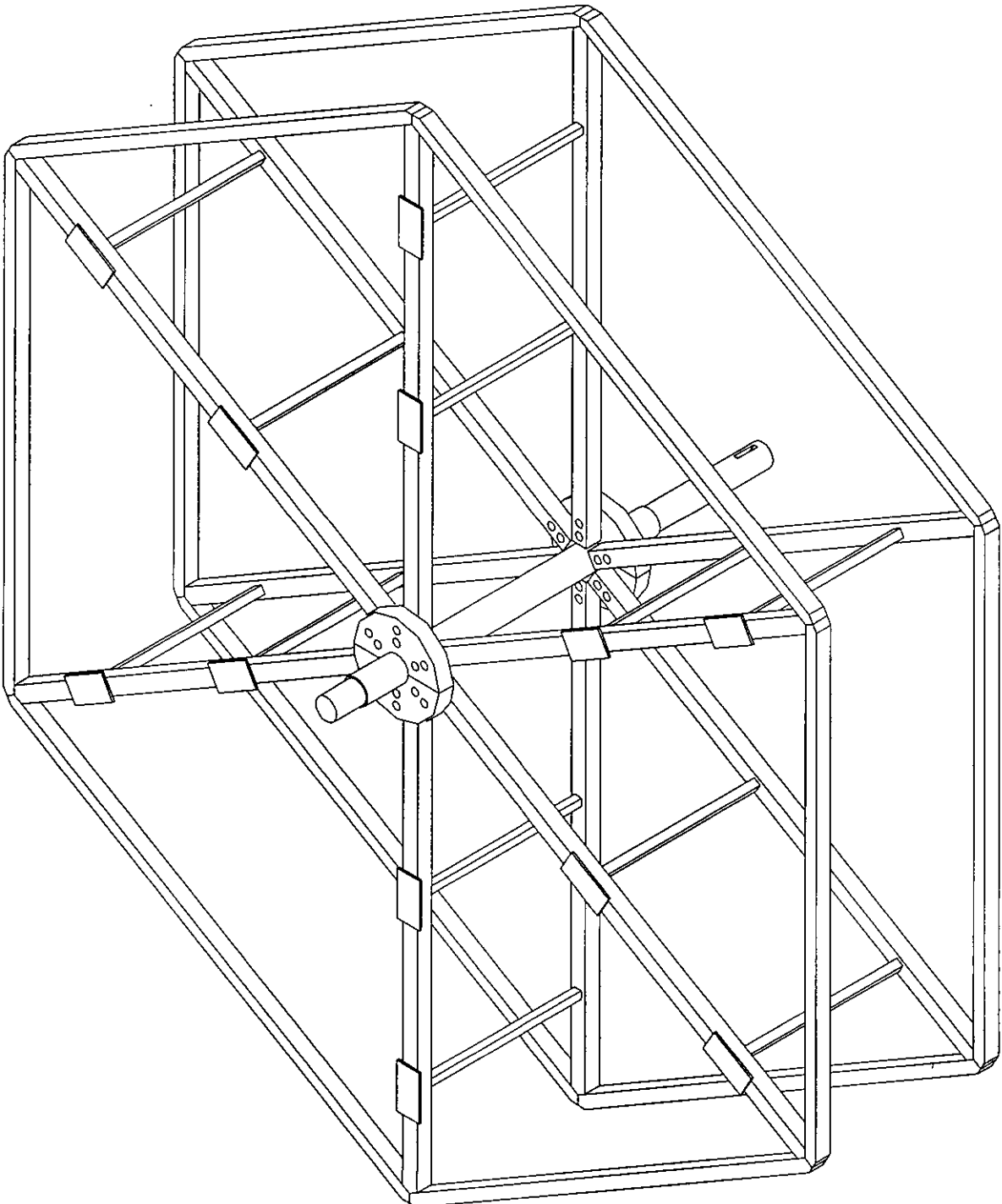


En conclusión, la estructura consiste básicamente de los siguientes elementos:

- El eje, sobre el que se soporta el acoplamiento para las barras radiales y el sistema de transmisión de potencia,
- Las barras radiales, que forman las seis secciones donde se colocarán los bloques de tubos, además de transmitir la potencia del eje al medio de soporte,
- Las barras axiales, que permiten la unión entre las barras radiales y contribuyen a la distribución de esfuerzos axiales actuando como un refuerzo,
- Los soportes axiales, que impiden que los bloques de tubos pudieran presentar deslizamientos a lo largo del eje y transmiten a las barras radiales las cargas axiales provocadas por la inclinación del sistema y,

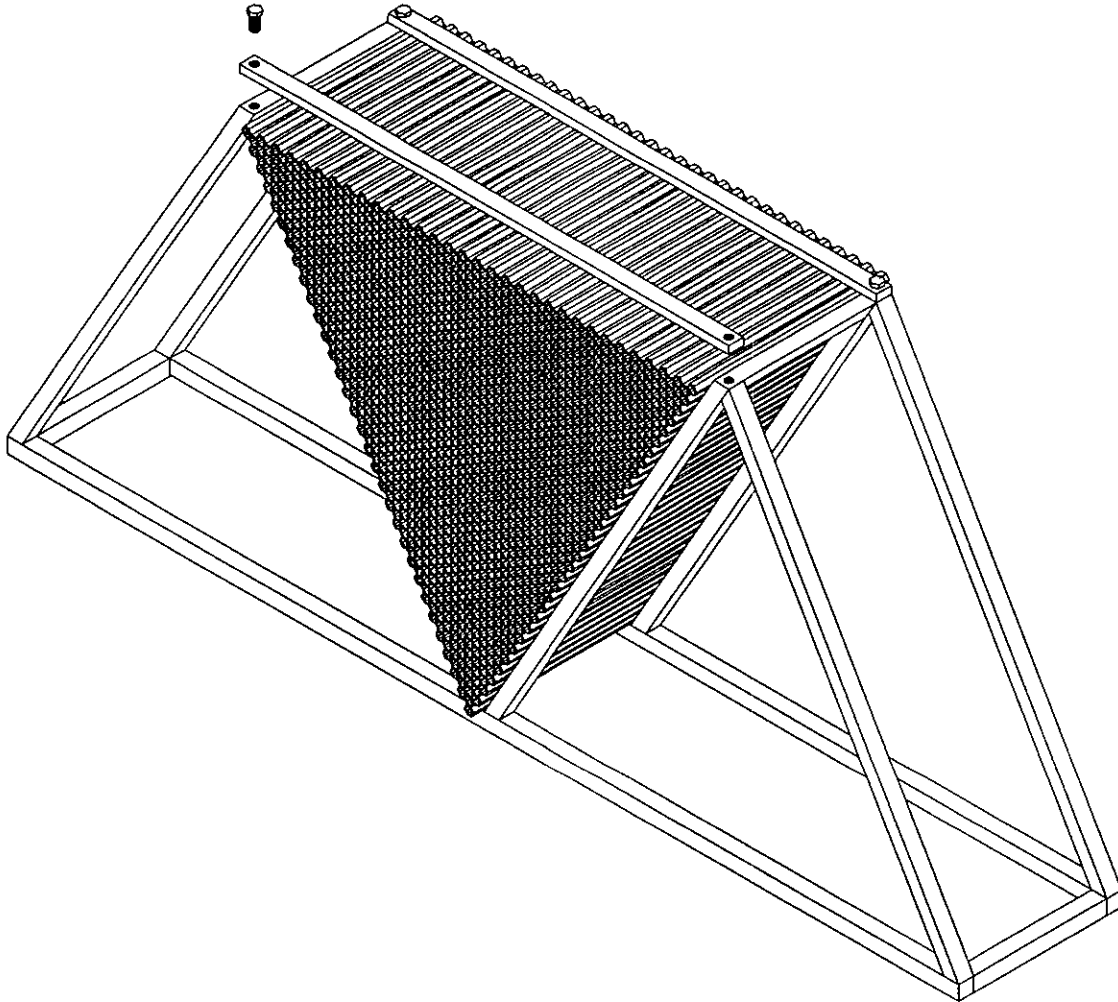
- Los elementos periféricos (Cinturón) que mantienen a los bloques de tubos en su posición adecuada además de permitir de igual forma la unión en los extremos de las barras radiales y la distribución de esfuerzos,

Los elementos antes descritos se muestran en el siguiente esquema tal como se apreciarían una vez ensamblados.



### 3.2 ENSAMBLADOR

Para formar los bloques de tubos que se colocarán en las secciones de la estructura se diseñó un ensamblador que tiene el tamaño y la forma de las secciones mencionadas. Este aparato permite acomodar y alinear manualmente los 1489 tubos que constituyen cada uno de los bloques del medio de soporte.



Para lograr la unión entre los tubos individuales de modo que formen al bloque se proponen las siguientes alternativas:

- Unir los extremos de tubos adyacentes por medio de calor: ya sea por medio de planchas térmicas, flama directa o algún otro medio con el que se logre una temperatura cercana a los  $140^{\circ}\text{C}$ , que corresponde a la temperatura de fusión del polietileno de alta densidad.
- Unir tubos adyacentes por medio de materiales adhesivos capaces de soportar las condiciones de esfuerzo cortante ( $14.4\text{ KPa}$  aproximadamente) sin que se altere la separación entre las paredes exteriores de los tubos en contacto.

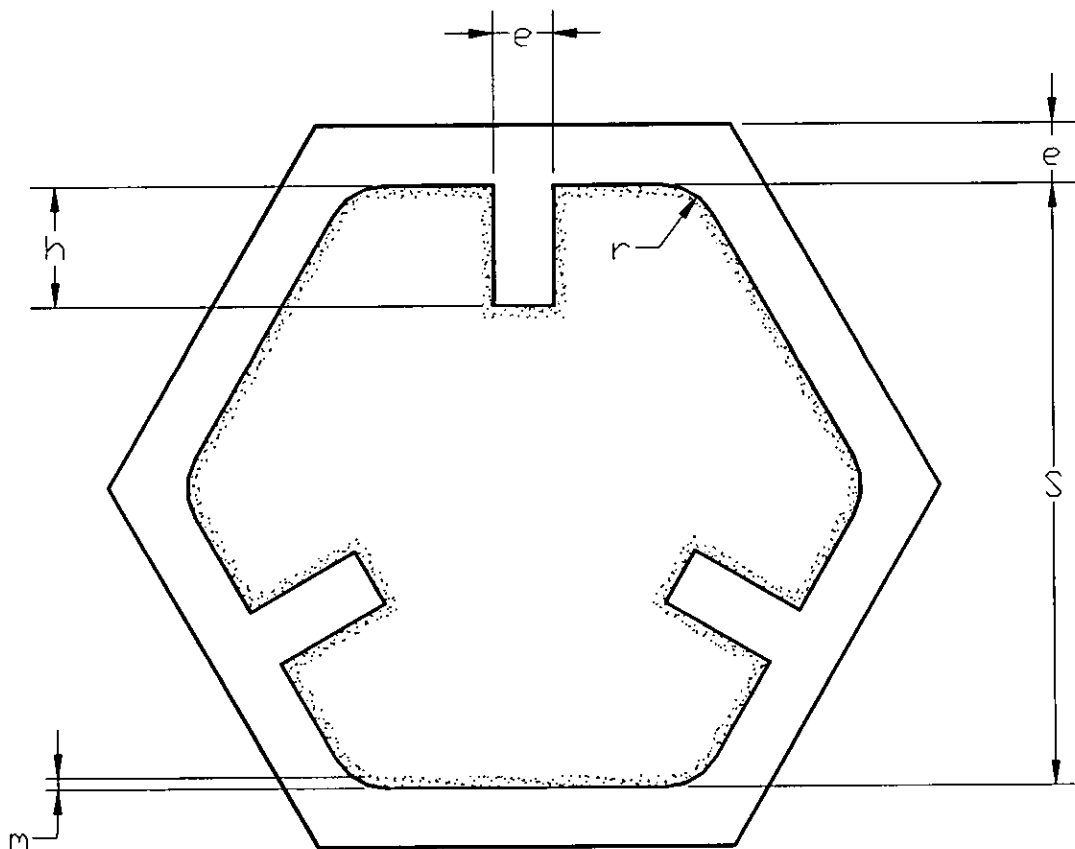


### 3.3 ANÁLISIS DE CARGAS EN EL MEDIO DE SOPORTE

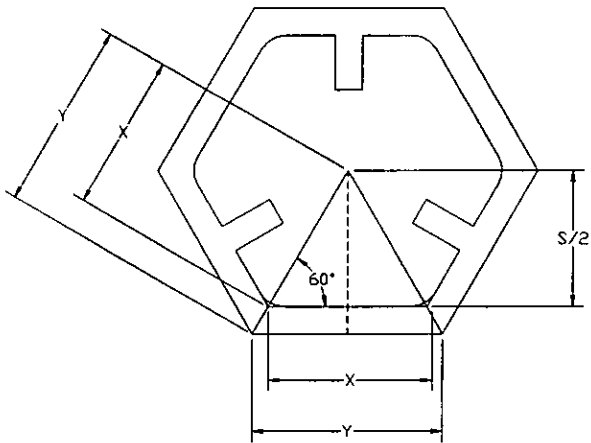
Una vez concretado el diseño conceptual de la estructura y la manera de acomodar los tubos en la misma se inicia al diseño de detalle del equipo, en el cual se deben definir las dimensiones correspondientes y el material adecuado para cada una de las piezas, de tal forma que soporten el estado de esfuerzos al que estarán sometidas.

Antes de analizar las condiciones de carga bajo las cuales operará el equipo se requiere hacer una estimación del peso de los tubos, la biomasa que habitará en ellos y la estructura del sistema; sin embargo, hasta este momento no se ha definido completamente la geometría de los tubos ya que su espesor está en función de las cargas que éstos deben soportar por lo que en los cálculos correspondientes a las mismas se realizarán manejando dichas variables como incógnitas.

En el capítulo anterior se definió al medio de soporte como un conjunto de tubos de forma hexagonal con tres lengüetas internas de 5mm de longitud y con una separación entre superficies internas de 25 mm. Además, para dar resistencia a la ruptura se decidió colocar un chaflán entre las paredes internas de los mismos. En la siguiente figura se muestra la geometría de un tubo, donde "s" representa la separación entre las superficies internas del tubo; "h", la longitud de las lengüetas; "e", el espesor del tubo; "r", el radio del chaflán; y "m", el espesor de la biomasa.



Así, para diseñar el tubo primero se determina la carga que soportará, por lo que a continuación se hace una estimación de la masa de los tubos que conforman el medio de soporte, el área de contacto disponible y la masa de los microorganismos que habitará en ellos.

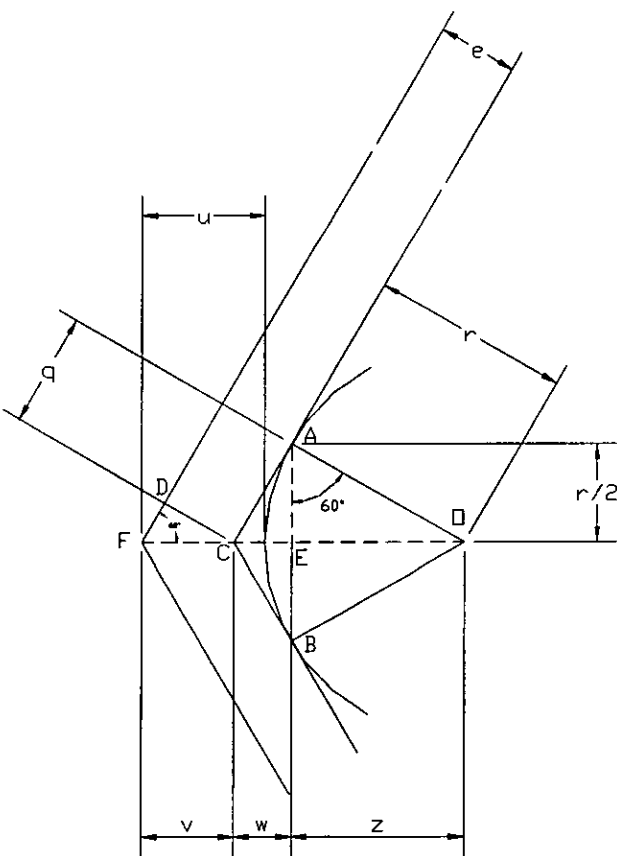


$$\text{Sen } 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{s}{2x}$$

$$\Rightarrow x = \frac{s}{\sqrt{3}}$$

$$\text{Sen } 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{s + 2e}{x}$$

$$\Rightarrow y = \frac{s + 2e}{\sqrt{3}}$$



$$\text{Sen } 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{z}{r} \Rightarrow z = \frac{\sqrt{3} r}{2}$$

$$\text{Sen } 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{r}{2q} \Rightarrow q = \frac{r}{\sqrt{3}}$$

$$\text{Cos } 60^\circ = \frac{1}{2} = \frac{w}{q} \Rightarrow w = \frac{q}{2} = \frac{r}{2\sqrt{3}}$$

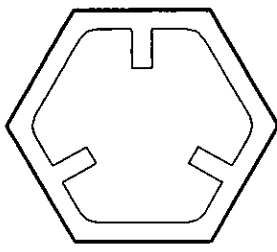
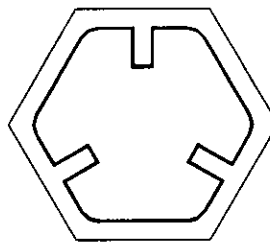
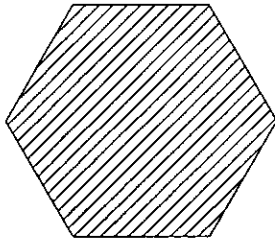
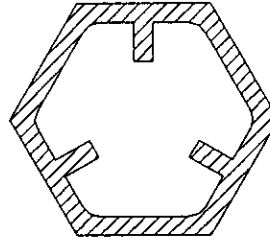
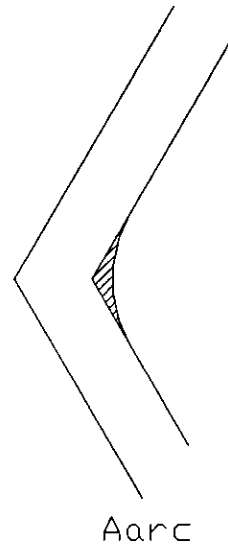
$$\text{Sen } 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{e}{v} \Rightarrow v = \frac{2e}{\sqrt{3}}$$

$$u = v + w + z - r = \frac{2e}{\sqrt{3}} + \frac{r}{2\sqrt{3}} + \frac{\sqrt{3} r}{2} - r$$

$$u = \frac{4\sqrt{3} e + \sqrt{3} r + 3\sqrt{3} r}{6} - r$$

$$u = \frac{2\sqrt{3} e + 2\sqrt{3} r}{3} - r$$

$$u = \frac{2\sqrt{3}}{3} (e + r) - r = \frac{2(e + r)}{\sqrt{3}} - r$$

P<sub>ext</sub>P<sub>int</sub>A<sub>hex</sub>A<sub>oc</sub>A<sub>arc</sub>

$$P_{ext} = 6\gamma = 6 \left[ \frac{s+2e}{\sqrt{3}} \right] = 2\sqrt{3}(s+2e)$$

$$P_{int} = 6(x-2q) + 2\pi r + 6h = 6 \left[ \frac{s}{\sqrt{3}} - \frac{2r}{\sqrt{3}} \right] + 2\pi r + 6h = 2\sqrt{3}(s-2r) + 2\pi r + 6h = 2\sqrt{3}s - 2r(2\sqrt{3} - \pi) + 6h$$

$$A_{hex} = \frac{P_{ext}}{2} \left[ \frac{s+2e}{2} \right] = \left[ \frac{2\sqrt{3}(s+2e)}{2} \right] \left[ \frac{s+2e}{2} \right] = \frac{\sqrt{3}(s+2e)^2}{2}$$

$$A_{arc} = A(\triangle ABC) + A(\triangle AOB) - A(\angle AOB) = \frac{r}{2}(w) + \frac{r}{2}(z) - \frac{\pi r^2}{6} = \frac{r}{2} \left[ \frac{r}{2\sqrt{3}} + \frac{\sqrt{3}r}{2} \right] - \frac{\pi r^2}{6} = \frac{r}{2} \left[ \frac{4\sqrt{3}r}{6} \right] - \frac{\pi r^2}{6}$$

$$A_{arc} = \frac{2\sqrt{3}r^2}{6} - \frac{\pi r^2}{6} = \frac{r^2(2\sqrt{3} - \pi)}{6}$$

$$A_{oc} = A_{hex} - \frac{6x}{2} \left[ \frac{s}{2} \right] + 6(A_{arc}) + 3he = \frac{\sqrt{3}(s+2e)^2}{2} - 3 \left[ \frac{s}{\sqrt{3}} \right] \left[ \frac{s}{2} \right] + r^2(2\sqrt{3} - \pi) + 3he$$

$$A_{oc} = \frac{\sqrt{3}(s+2e)^2}{2} - \frac{\sqrt{3}s^2}{2} + r^2(2\sqrt{3} - \pi) + 3ht = \frac{\sqrt{3}(s^2 + 4se + 4e^2 - s^2)}{2} + r^2(2\sqrt{3} - \pi) + 3he$$

$$A_{oc} = 2\sqrt{3}e(s+e) + r^2(2\sqrt{3} - \pi) + 3he$$

Con los parámetros anteriormente calculados se pueden determinar la masa de los tubos " $m_t$ ", la de la biomasa que habita en el sistema " $m_b$ " (se recuerda que la densidad de la biomasa es igual a la del agua), y por lo tanto la masa del sistema " $m_s$ " (la cual está multiplicada por un factor de 1.6 para considerar el peso de la estructura), el área de contacto " $A_{ct}$ ", la densidad de área " $\rho_a$ " y el peso del sistema " $P$ " (que se utilizará para todos los cálculos de la estructura). En lo siguiente se considera:

$\rho$  = Densidad del agua

$\gamma$  = Densidad relativa del polietileno

$N_t$  = Número de tubos en el sistema

$R$  = Radio del sistema

$L$  = Longitud del sistema

$A_s$  = Área de la sección transversal del sistema

$$m_t = N_t \rho \gamma L (A_{oc})$$

$$m_b = N_t \rho m L (P_{int})$$

$$A_s = \frac{6R}{2} \left[ \frac{\sqrt{3}R}{2} \right] = 3R \left[ \frac{\sqrt{3}R}{2} \right] = \frac{3\sqrt{3}R^2}{2}$$

$$A_{ct} = N_t L (P_{int})$$

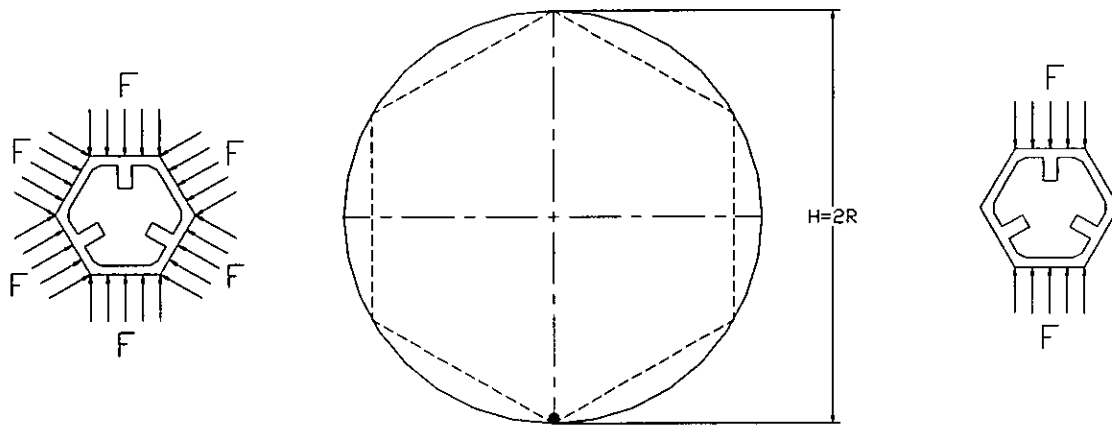
$$\rho_a = \frac{A_{ct}}{L A_s} = \frac{N_t L P_{int}}{L A_s} = \frac{N_t P_{int}}{A_s} = \frac{2 N_t P_{int}}{3\sqrt{3} R^2}$$

$$m_s = 1.6 (m_t + m_b) = 1.6 \rho L N_t (\gamma A_{oc} + m P_{int})$$

$$P = g m_s$$

Antes de sustituir los parámetros correspondientes en las ecuaciones anteriores es necesario determinar la carga que soportará el tubo crítico en función de dichos parámetros, pero ¿cuál es el tubo que soporta más carga en una posición arbitraria del reactor?

Si se considera que el sistema es un cilindro que contiene un "fluido" de cierta densidad, la partícula que soporta mayor presión es la que se encuentra a mayor profundidad respecto a la "superficie libre", como se muestra en la siguiente figura, entonces el tubo crítico es el que se encuentra en la parte inferior del sistema y la presión resultante actúa en todas sus caras.



Entonces si:

$P_r$  = Presión

$F$  = Fuerza que soporta el tubo crítico

$A$  = Área sobre la que actúa la fuerza

$\rho_s$  = Densidad del sistema

$g$  = Aceleración gravitacional

$H$  = Altura

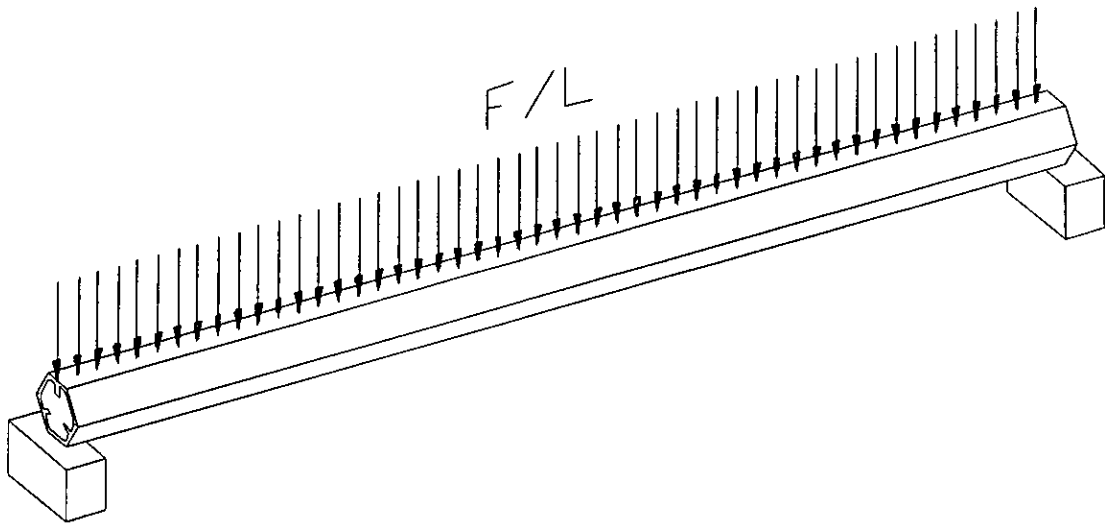
$V_s$  = Volumen del sistema

$$P_r = \frac{F}{A} = \rho_s g H = \frac{m_s g}{V_s} H = \frac{P}{V_s} (2R) = \frac{2PR}{A_s L} = 2PR \left[ \frac{2}{3\sqrt{3} R^2 L} \right] = \frac{4P}{3\sqrt{3} RL}$$

$$\Rightarrow F = \frac{4PA}{3\sqrt{3} RL} = \frac{4PyL}{3\sqrt{3} RL} = \frac{4Py}{3\sqrt{3} R} = \left[ \frac{4P}{3\sqrt{3} R} \right] \left[ \frac{s+2e}{\sqrt{3}} \right] = \frac{4(s+2e)P}{9R}$$

Por lo tanto, el tubo crítico soporta esta fuerza en cada una de sus caras como se muestra en la parte izquierda de la figura anterior; sin embargo, para su diseño se considera que ésta fuerza sólo actúa en la parte superior e inferior, debido a que este caso es más crítico, y se modela como una viga apoyada en sus extremos con una carga "F" uniformemente distribuida, como se muestra en la figura siguiente.

De esta forma es posible determinar el estado de esfuerzos al que está sometido dicho tubo y establecer, por medio del criterio de Von Mises, un esfuerzo de diseño para compararlo con el esfuerzo permisible, el cual se obtiene a partir del esfuerzo de cedencia del material y un factor de diseño. Este último se considera de 4 debido a que los tubos están sometidos a fatiga por la rotación del sistema. Finalmente, en el diseño del tubo también se analizó la resistencia a la ruptura en los puntos donde se unen las paredes internas, por lo que se colocó un chaflán para disminuir la concentración de esfuerzos.



Para lograr acomodar el mayor número de tubos en el sistema se requiere que su espesor sea mínimo; sin embargo, si éste es muy pequeño se incrementa considerablemente el costo de manufactura del dado para su extrusión. Por lo tanto, se determinó que el espesor mínimo del tubo, manteniendo un costo de fabricación razonable, sea de 1/16". De esta forma, es posible acomodar 8934 tubos en el sistema. Sustituyendo los siguientes parámetros en las ecuaciones anteriores se obtiene:

$s = 25 \text{ mm}$ $h = 5 \text{ mm}$ $e = r = 1/16 \text{ pulg}$ $m = 500 \text{ } \mu\text{m}$ $N_t = 8934$ $R = 1.65 \text{ m}$ $L = 65 \text{ cm}$ $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ $\gamma = 0.94$	$A_{ct} = 671 \text{ m}^2$ $\rho_a = 146 \text{ m}^2/\text{m}^3$ $m_t = 932.6 \text{ kg}$ $m_b = 335.6 \text{ kg}$ $m_s = 2030 \text{ kg}$ $P = 19.92 \text{ kN}$ $F = 152 \text{ N}$
--	---

Así, el tubo se modeló con una carga de 152 N (15.5 kg) uniformemente distribuida sobre una de sus caras y se comprobó, analizando el estado de esfuerzos resultante, que la resiste sin problemas, por lo que los datos anteriormente expuestos son definitivos para su diseño.

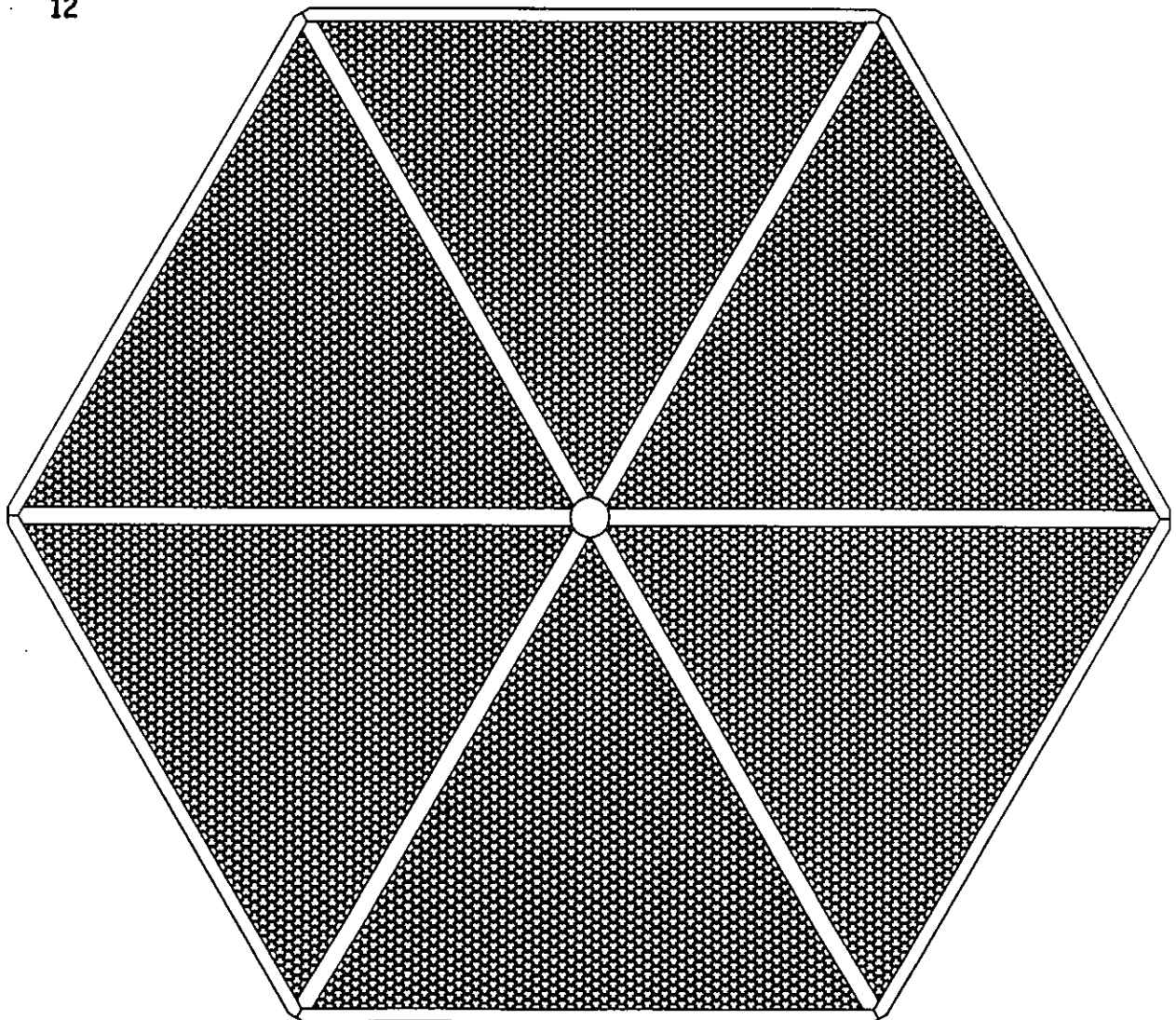
Finalmente, el peso del sistema (con biomasa) es de aproximadamente dos toneladas. Este dato se utilizará para analizar las cargas que debe soportar la estructura.

### 3.4 ANÁLISIS DE CARGAS EN LA ESTRUCTURA

Para realizar el diseño de detalle de los elementos que conforman la estructura del sistema (cinturones, barras radiales, barras axiales, eje y acoplamiento) es necesario analizar las condiciones de carga a las que estarán sometidas. Sin embargo, en algunos elementos, estas condiciones no son constantes, ya que varían conforme el sistema gira, por lo que es necesario determinar las cargas críticas en cada uno de los elementos mencionados. Para lo anterior, se analizaron las cargas que soportan los elementos de la estructura en la posición que se muestra a continuación. De esta forma, fue posible definir la variación del estado de esfuerzos de los cinturones y barras radiales, ya que al resolver dicha estructura se determinan conjuntamente las cargas que soportan estos elementos cada  $60^\circ$ .

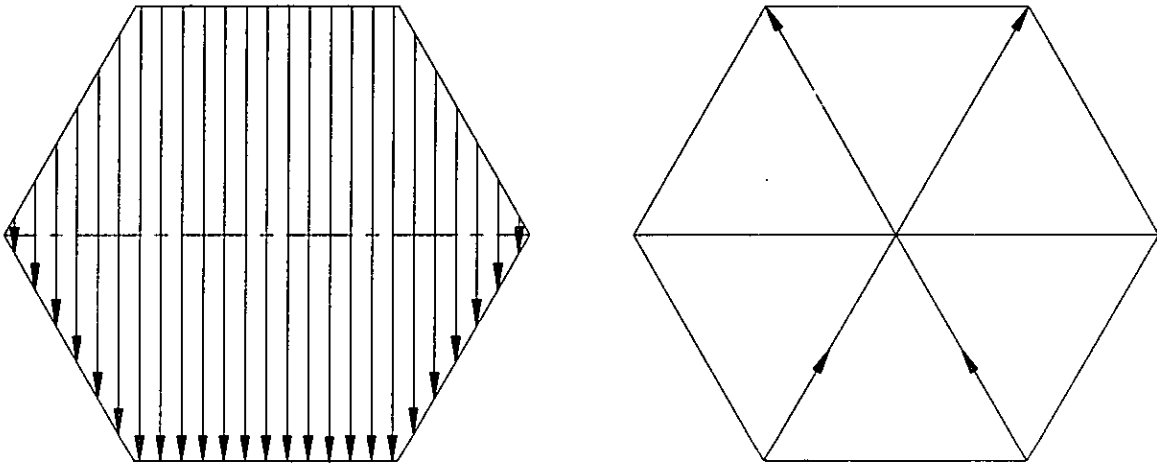
Debido a que cada bloque se encuentra siempre sostenido en sus extremos por dos apoyos, entonces cada uno de éstos soporta la mitad del peso del bloque, por lo que para resolver esta estructura se considera que los bloques tienen un peso:

$$W = \frac{P}{12}$$

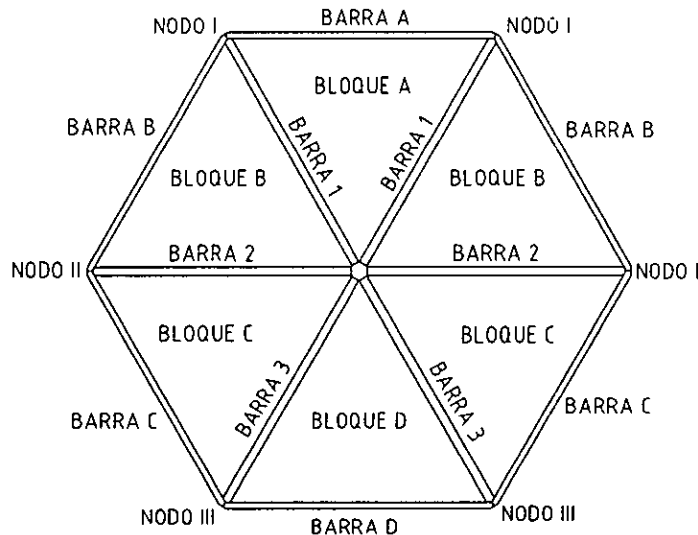


Aparentemente, la carga que soportan las barras radiales es el peso del bloque de tubos situado en su parte superior; sin embargo, como éstas están apoyadas en los tubos que están por debajo de ellas, entonces sólo soportan cargas de tensión o compresión. El peso de todo el sistema, exceptuando el del eje, lo soportan los cinturones, los cuales transmiten esta carga a las barras radiales, que a su vez se apoyan en el eje.

Así, los cinturones inferiores soportan una carga distribuida, como la que se muestra en la siguiente figura, la cuál se transmite a las barras radiales inferiores, que se encuentran a tensión, y a los cinturones superiores, que a su vez, se apoyan en las barras radiales superiores, por lo que estas últimas se encuentran a compresión. Como se puede observar en la figura, cuando las barras radiales están a  $0^\circ$  y a  $180^\circ$ , no soportan ningún tipo de carga.

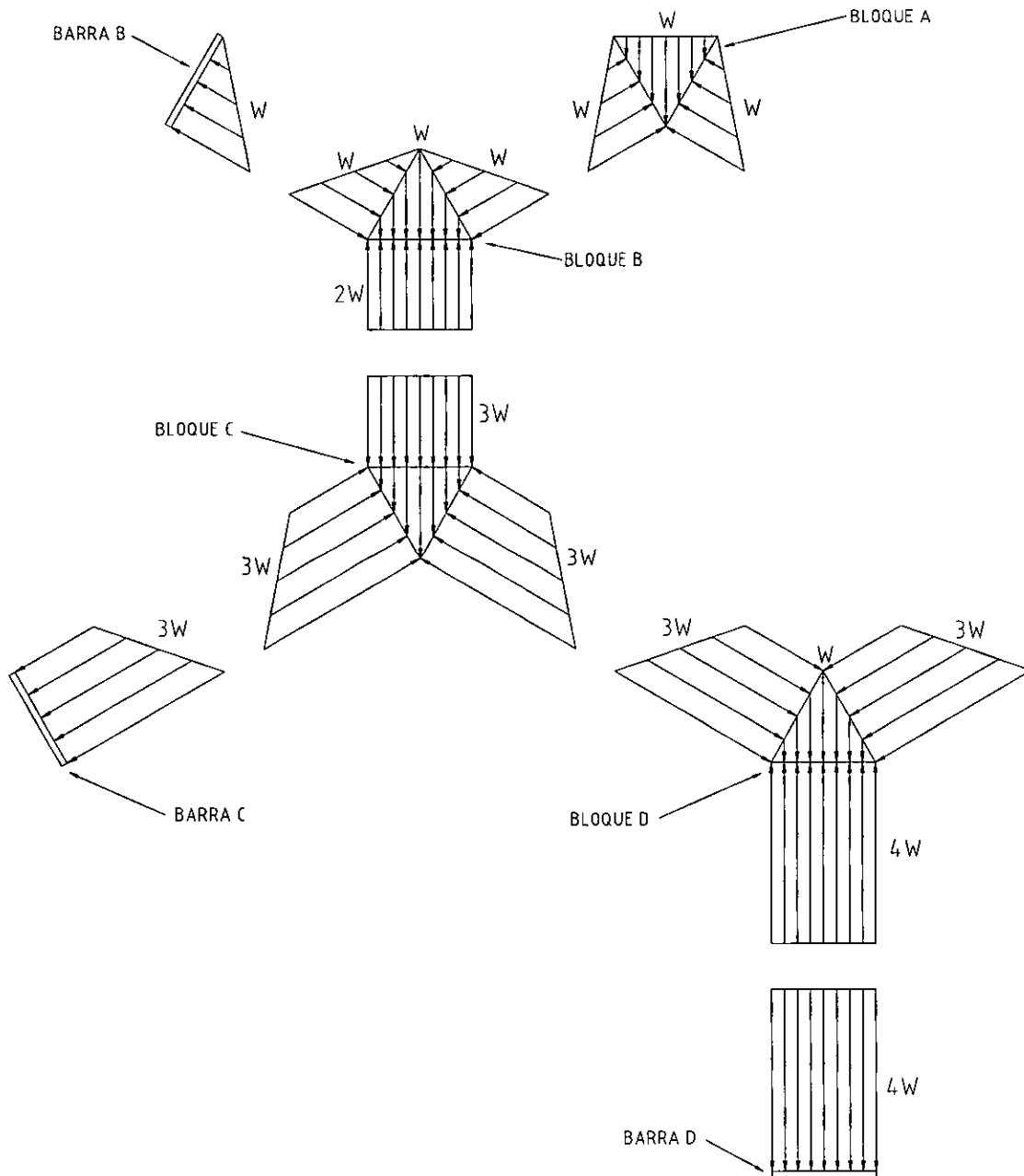


En lo siguiente, a los elementos de esta estructura se les llama como se muestra a continuación. Es importante observar que debido a la simetría del sistema los elementos que tienen el mismo nombre están sujetos a las mismas cargas.





Así, el bloque de tubos "A", que está apoyado en las barras "1", tiene una distribución de cargas como la que se muestra en la siguiente figura, donde  $W$  representa la mitad de su peso. Así mismo, dichas barras se apoyan en los bloques "B", por lo que éstos provocan las reacciones que se muestran en los cinturones "B" y los bloques "C". De igual forma, éstos últimos, se apoyan en las barras "C" y "3"; y éstas, en el bloque "D", que a su vez reacciona con el cinturón "D".

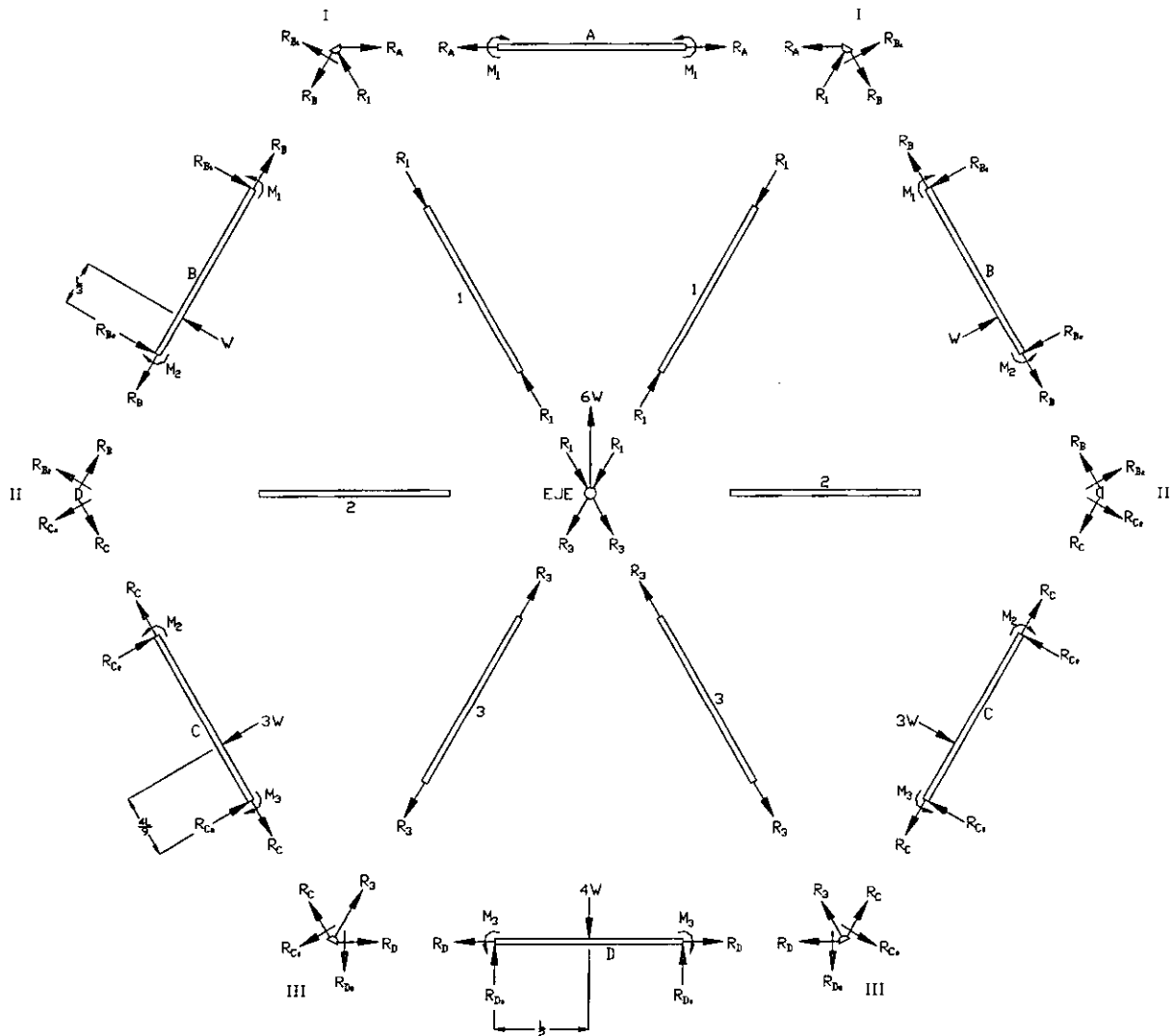


A través de este análisis fue posible determinar la distribución de cargas transversales en las barras "B", "C" y "D" que representan los cinturones del sistema (el cinturón superior "A" no está sujeto a carga transversal).

Además, cada cinturón se encuentra apoyado en los nodos correspondientes, que a su vez se sostienen en otras barras, por lo que existen reacciones cortantes y momentos flexionantes en sus extremos no determinados hasta este punto. Así mismo, por la configuración de la estructura, los cinturones también deberán soportar cargas de tensión o compresión, que sólo es posible determinar a través de un análisis global de la estructura.

Para resolver ésta última se separaron, como se muestra a continuación, cada uno de los elementos que la conforman con todas las reacciones que deben soportar, quedando por determinar las siguientes 14 incógnitas:

- Fuerzas axiales en los cinturones:  $R_A$ ,  $R_B$ ,  $R_C$  y  $R_D$
- Fuerzas axiales en las barras radiales:  $R_1$  y  $R_3$
- Reacciones transversales en los cinturones:  $R_{B1}$ ,  $R_{B2}$ ,  $R_{C2}$ ,  $R_{C3}$  y  $R_{D3}$
- Momentos flexionantes en los cinturones:  $M_1$ ,  $M_2$  y  $M_3$

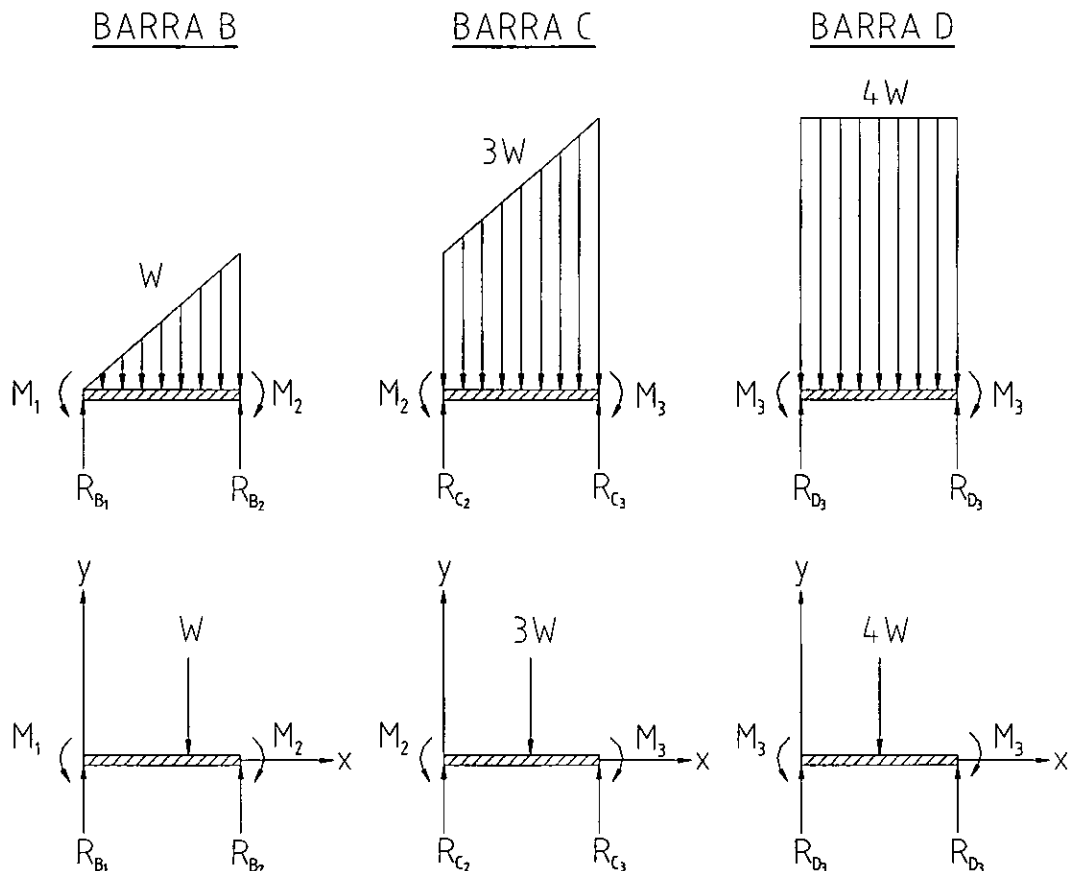


A través de este sistema de fuerzas, con un diagrama de cuerpo libre para cada elemento, es posible plantear 11 ecuaciones *independientes*: dos para cada nodo, "I", "II" y "III" ( $\Sigma F_x=0$ ,  $\Sigma F_y=0$ ); y para cada cinturón, "B", "C" y "D" ( $\Sigma F=0$ ,  $\Sigma M=0$ ), por lo que es necesario buscar tres ecuaciones más, independientes de las 11 anteriores, que permitan resolver el sistema.

Pero, a partir de la distribución de cargas en los cinturones, expuestas anteriormente, es posible plantear las ecuaciones adecuadas para determinar las reacciones y los momentos resultantes en cada uno de sus apoyos.

Sin embargo, es importante tomar en cuenta que los nodos no representan apoyos fijos para los cinturones ya que tanto éstos como las barras radiales están expuestos a un sistema de cargas que da como resultado la deformación de todos los elementos de la estructura, y en consecuencia, los nodos no permanecen fijos: se trasladan de acuerdo a las deformaciones que sufren los elementos interconectados, por lo que no es posible considerar que la deflexión de los cinturones en los nodos es nula. Pero, el valor de la pendiente de la deflexión es cero en los apoyos y con esta condición de frontera en la función de pendiente de los cinturones "B", "C" y "D" se obtienen las tres ecuaciones que faltaban para completar el sistema.

Así, a continuación se calculan las reacciones de las cinturones "B", "C" y "D".



En el cinturón "D":

$\Sigma F_y = 0 \quad 2R_{D3} = 4W$ $\Rightarrow R_{D3} = 2W$ $W(x) = -\frac{4W}{L}$ $V(x) = -\frac{4W}{L}x + 2W$	$M(x) = -\frac{2W}{L}x^2 + 2Wx - M_3$ $\theta(x) = -\frac{2W}{3L}x^3 + Wx^2 - M_3x$ $\theta(L) = -\frac{2WL^2}{3} + WL^2 - M_3L = 0$ $\Rightarrow M_3 = \frac{WL}{3}$
---	---

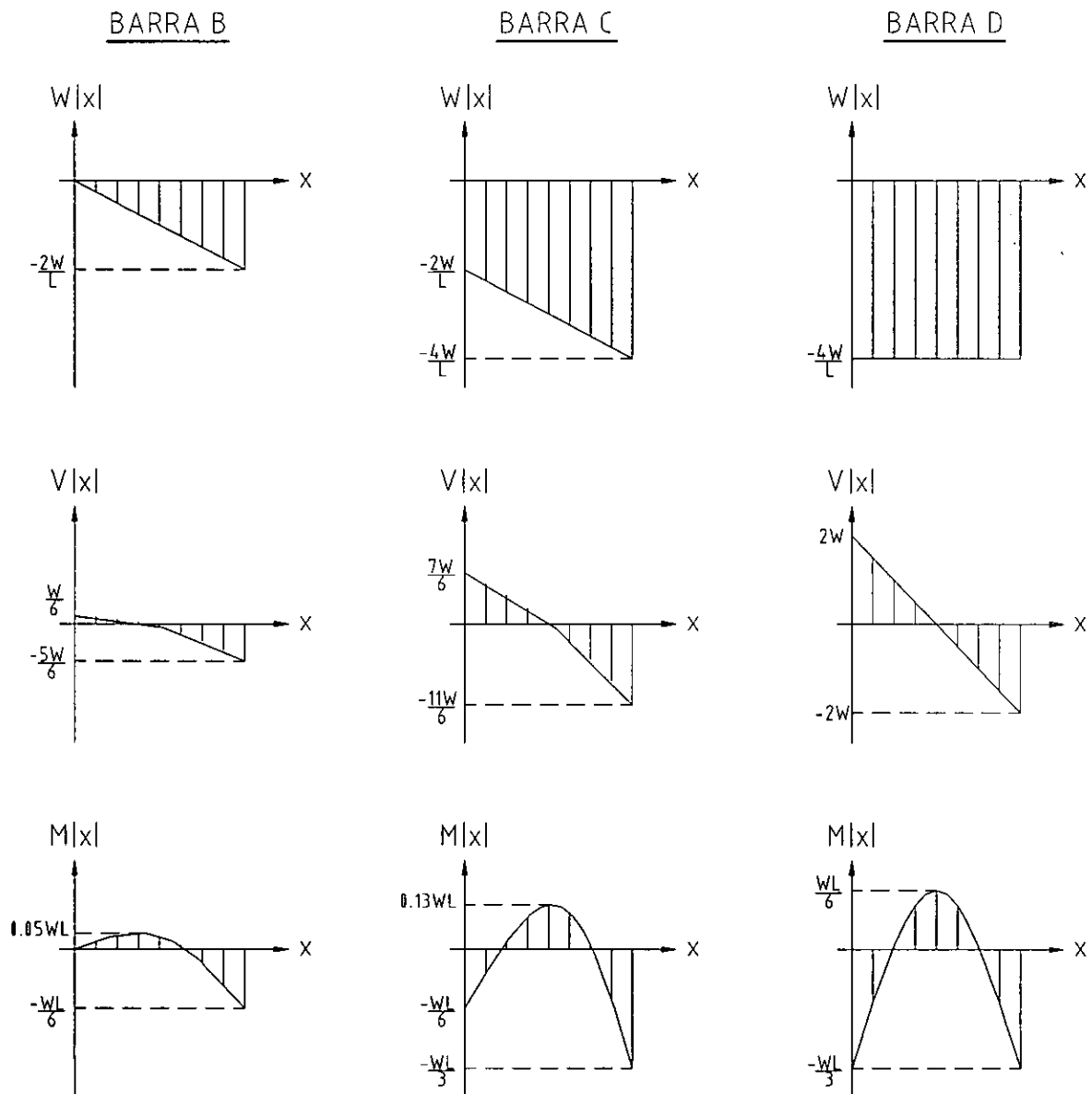
En el cinturón "C":

$W(x) = -\frac{2W}{L^2}x - \frac{2W}{L}$ $V(x) = -\frac{W}{L^2}x^2 - \frac{2W}{L}x + R_{C2}$ $M(x) = -\frac{W}{3L^2}x^3 - \frac{W}{L}x^2 + R_{C2}x - M_2$ $M(L) = -\frac{4WL}{3} + R_{C2}L - M_2 = -M_3 = -\frac{WL}{3}$ $\Rightarrow M_2 = -WL + R_{C2}L$ $M(x) = -\frac{W}{3L^2}x^3 - \frac{W}{L}x^2 + R_{C2}x + [WL - R_{C2}L]$ $\theta(x) = -\frac{W}{12L^2}x^4 - \frac{W}{3L}x^3 + \frac{R_{C2}}{2}x^2 + [WL - R_{C2}L]x$ $\theta(L) = \frac{7WL^2}{12} - \frac{R_{C2}L^2}{2} = 0$ $\Rightarrow R_{C2} = \frac{7W}{6} \quad M_2 = \frac{WL}{6}$ $\Sigma F = 0 \quad R_{C2} + R_{C3} = 3W \quad \Rightarrow R_{C3} = \frac{11W}{6}$	<p style="text-align: center;">En el cinturón "B":</p> $W(x) = -\frac{2W}{L^2}x$ $V(x) = -\frac{W}{L^2}x^2 + R_{B1}$ $M(x) = -\frac{W}{3L^2}x^3 + R_{B1}x - M_1$ $M(L) = -\frac{WL}{3} + R_{B1}L - M_1 = -M_2 = -\frac{WL}{6}$ $\Rightarrow M_1 = -\frac{WL}{6} + R_{B1}L$ $M(x) = -\frac{W}{3L^2}x^3 + R_{B1}x + \left[\frac{WL}{6} - R_{B1}L\right]$ $\theta(x) = -\frac{W}{12L^2}x^4 + \frac{R_{B1}}{2}x^2 + \left[\frac{WL}{6} - R_{B1}L\right]x$ $\theta(L) = \frac{WL^2}{12} - \frac{R_{B2}L^2}{2} = 0$ $\Rightarrow R_{B1} = \frac{W}{6} \quad M_1 = 0$ $\Sigma F = 0 \quad R_{B1} + R_{B2} = W \quad \Rightarrow R_{B2} = \frac{5W}{6}$
---	---

Por lo tanto, las reacciones en los apoyos son:

$R_{B1} = \frac{W}{6}$	$R_{B2} = \frac{5W}{6}$	$R_{C2} = \frac{7W}{6}$	$R_{C3} = \frac{11W}{6}$	$R_{D3} = 2W$
$M_1 = 0$	$M_2 = \frac{WL}{6}$	$M_3 = \frac{WL}{3}$		

Y en la siguiente figura se pueden observar los diagramas de distribución de cargas, fuerza cortante y momento flexionante de cada uno de los cinturones.



Así, el sistema se ha reducido a 6 incógnitas y para determinarlas basta plantear las ecuaciones de equilibrio en el eje y los tres nodos.

EJE:

$$\Sigma F_y = 0 \quad R_3 = 2\sqrt{3}W - R_1$$

NODO I:

$$\Sigma F_y = 0 \quad R_B = R_1 + \frac{\sqrt{3}W}{18}$$

$$\Sigma F_x = 0 \quad R_A = \frac{R_1}{2} + \frac{R_B}{2} + \frac{\sqrt{3}W}{12} = \frac{R_1}{2} + \frac{R_1}{2} + \frac{\sqrt{3}W}{36} + \frac{\sqrt{3}W}{12} = R_1 + \frac{\sqrt{3}W}{9}$$

NODO II:

$$\Sigma F_y = 0 \quad R_C = R_B - \frac{\sqrt{3}W}{9} = R_1 + \frac{\sqrt{3}W}{18} - \frac{\sqrt{3}W}{9} = R_1 - \frac{\sqrt{3}W}{18}$$

$$\Sigma F_x = 0 \quad R_C = 2\sqrt{3}W - R_B = 2\sqrt{3}W - R_1 - \frac{\sqrt{3}W}{18} = \frac{35\sqrt{3}W}{18} - R_1$$

Igualando las dos ultimas ecuaciones:

$$R_1 - \frac{\sqrt{3}W}{18} = \frac{35\sqrt{3}W}{18} - R_1 \quad \Rightarrow \quad R_1 = \sqrt{3}W$$

Sustituyendo en las primeras 4 ecuaciones:

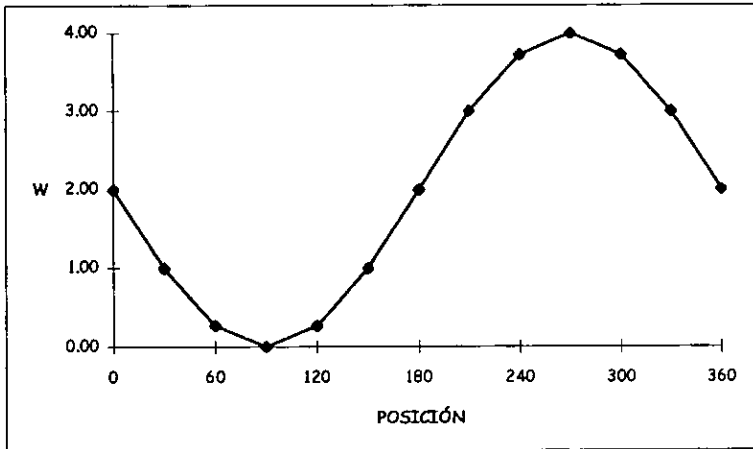
$$R_3 = \sqrt{3}W \quad R_A = \frac{10\sqrt{3}W}{9} \quad R_B = \frac{19\sqrt{3}W}{18} \quad R_C = \frac{17\sqrt{3}W}{18}$$

NODO III:

$$\Sigma F_y = 0 \quad R_3 + R_C = \frac{35\sqrt{3}W}{18}$$

$$\Sigma F_x = 0 \quad R_D = \frac{11\sqrt{3}W}{12} - \frac{R_3}{2} + \frac{R_C}{2} = \frac{11\sqrt{3}W}{12} - \frac{\sqrt{3}W}{2} + \frac{17\sqrt{3}W}{36} = \frac{8\sqrt{3}W}{9}$$

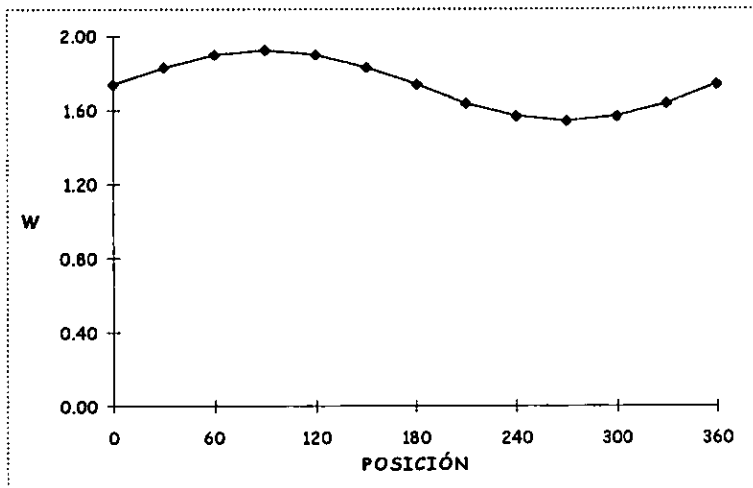
Una vez conocidas las reacciones en cada uno de los elementos de la estructura se puede observar que la variación de cargas, tanto axiales como transversales, en los cinturones y barras radiales es senoidal. Y por lo tanto, es posible prever el estado de cargas a las que están expuestos estos elementos en cualquier posición por medio de las funciones que se muestran a continuación.



### VARIACIÓN DE CARGAS TRANSVERSALES EN LOS CINTURONES

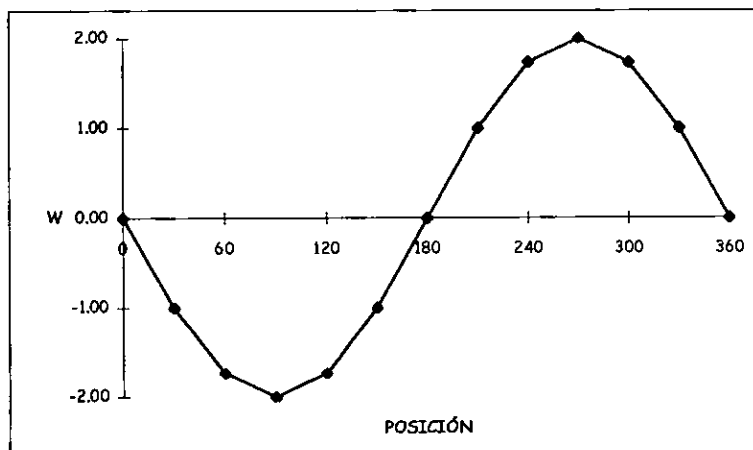
$$W(\theta) = 2W (1 - \text{SEN } \theta)$$

**ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA**



### VARIACIÓN DE CARGAS AXIALES EN LOS CINTURONES

$$W(\theta) = \frac{\sqrt{3}}{9} W \text{ SEN } \theta + \sqrt{3} W$$



### VARIACIÓN DE CARGAS AXIALES EN LAS BARRAS RADIALES

$$W(\theta) = -2W \text{ SEN } \theta$$

Así, como se puede observar en las gráficas de cortante y momento flexionante de los cinturones, la posición crítica para estos elementos es cuando se encuentran a  $270^\circ$  de la horizontal (barra "D"), ya que tanto la fuerza cortante como el momento flexionante, máximos, son mayores que las de las barras "B" y "C".

Aunque la carga axial es mínima en esta posición, los cinturones se diseñaron con los valores máximos del cortante y momento flexionante obtenidos en la misma, ya que esta combinación de cargas es crítica comparada con la carga axial máxima. Además, como estos elementos están sometidos a fatiga se consideró un factor de diseño de 4 tomando en cuenta la amplitud y frecuencia de la carga cíclica, el número de ciclos (20 años a 3 RPM), el factor de forma, el factor de tamaño y el material de las barras.

Entonces, si  $P$  representa el peso total del sistema; y  $L$ , la longitud de los cinturones, los parámetros con los cuales se diseñaron los cinturones son:

$$V_{\max} = 2 \cdot W = \frac{P}{6} \quad M_{\max} = \frac{WL}{3} = \frac{PL}{36} \quad F_{\text{axial}} = \frac{8\sqrt{3} W}{9} = \frac{8\sqrt{3} P}{108}$$

Es importante hacer notar que en el análisis hasta aquí realizado no se ha tomado en cuenta la inclinación del sistema. Esto se debe básicamente, a que esta condición no afecta en mayor medida los cálculos realizados para las cargas estudiadas. Sin embargo, en el caso de las barras radiales, la inclinación del sistema es un factor preponderante en el análisis.

Se ha determinado hasta este punto las cargas axiales críticas (tensión y compresión) a las que las barras radiales son sometidas, pero falta por determinar entonces las cargas transversales generadas como consecuencia de la inclinación del sistema.

Recuérdese que la componente del peso de cada bloque, en la dirección paralela al eje, se trasmite a las barras radiales a través de los soportes axiales, de modo que para conocer la magnitud de estas cargas sobre dichas barras es necesario definir previamente la posición de tales soportes. Con un análisis geométrico relativamente simple fue posible determinar la posición de los soportes axiales de modo que la carga soportada por cada uno fuera idéntica. El resultado de este análisis permitió determinar que dicha posición fuera a  $\frac{1}{2}$  y  $\frac{5}{6}$  de la longitud de la barra radial tomando como referencia el eje del sistema, de modo que la carga transversal en dichos puntos es  $\frac{P \text{ SEN } 10^\circ}{24}$

Quedan entonces por determinar la reacción en la unión con el eje, el momento flexionante en este mismo punto y las cargas transmitidas a las barras axiales. Si se considera a las barras radiales como una viga en voladizo es necesario entonces,



además de las ecuaciones de equilibrio, determinar la deflexión de las barras radiales en los puntos de unión con las axiales, como una condición extra a la de desplazamiento cero en el apoyo. Con todo lo anterior en cuenta, fue posible determinar el estado de cargas para las barras radiales y axiales. Con base en los resultados obtenidos se determinó que la condición crítica para las barras radiales es el momento flexionante en la unión con el eje del sistema.

Finalmente, sólo queda por determinar las condiciones de carga para el eje del sistema. Este elemento puede modelarse de manera sencilla como una flecha sometida a un par de cargas de magnitud  $P/2$  en los puntos de unión con las barras radiales y las reacciones respectivas en sus apoyos, además de la correspondiente torca debida a la transmisión de potencia y el empuje axial ocasionado por la inclinación del sistema.

Una vez definidas completamente las condiciones de carga de todos los elementos del sistema se procedió a determinar sus dimensiones definitivas, incluyéndose las de los tornillos que permiten ensamblar y desensamblar dichos elementos.

### 3.5 GENERALIDADES

Antes de concluir, es prudente hacer algunas observaciones referentes a aspectos relacionados con el proceso de ensamble, la selección de materiales y el mecanismo de transmisión de potencia. Cabe aclarar que aunque estos aspectos no forman parte medular del trabajo aquí presentado, fueron necesariamente considerados dentro del proyecto global, y las observaciones que a continuación se presentan pueden ser fundamentales para que el funcionamiento del sistema permanezca dentro de los requerimientos inicialmente planteados.

#### Materiales

Se mencionó al inicio de este trabajo que uno de los aspectos más importantes a considerar son los efectos corrosivos que el medio provoca a los elementos metálicos del sistema. En el inciso anterior se calcularon las dimensiones de dichos elementos tomando en cuenta únicamente las propiedades mecánicas de aceros comúnmente usados en ingeniería; y se propone que el material para la manufactura de las barras, eje y acoplamientos sea acero al carbono AISI 1060 normalizado con un recubrimiento galvánico, mientras que los tornillos y demás accesorios susceptibles a corrosión sean de acero inoxidable. Por supuesto, estos materiales deben satisfacer las propiedades mecánicas consideradas en el diseño. Obviamente, la propuesta anterior debe ser revisada por un experto en corrosión de modo que se evite la formación de celdas galvánicas o de otros fenómenos corrosivos y puedan proponerse, en caso de ser necesario, propuestas alternativas.

### Transmisión de potencia

Debido a que el sistema biológico aquí propuesto presenta diferencias importantes respecto a los ya existentes no puede predecirse con exactitud el comportamiento de los microorganismos en este nuevo sistema. Se sabe que uno de los factores determinantes para la formación de la biopelícula es el tiempo de exposición aire-agua, que a su vez depende directamente de la velocidad angular del sistema.

Con lo anterior, fue requerido que dicha velocidad pudiera ser variable, al menos para el caso del prototipo, de modo que pudiera determinarse experimentalmente el rango de velocidades dentro del cual la formación de biopelícula sea adecuada. Esto obliga que el mecanismo de transmisión de potencia sea lo suficientemente flexible para realizar estos cambios con relativa facilidad.

Tomando en cuenta esto último, se propone un sistema de transmisión por cadena que incluya un juego de catarinas con relaciones tales que permitan cambiar la velocidad de 3 a 6 RPM con pasos intermedios, un juego de rodamientos rígidos de una hilera de bolas y dos soportes de pie para las mismas, los cuales se atornillarán a dos columnas cimentadas adecuadamente para resistir el peso del sistema y el empuje axial del mismo.

Por otro lado, tomando en cuenta el momento de inercia del sistema, su velocidad angular y el tiempo de arranque (1 seg) se estimó que la potencia necesaria para iniciar el movimiento del sistema es de  $\frac{1}{2}$  HP.

### Proceso de ensamble

Se mencionó anteriormente la conveniencia de formar separadamente los bloques de tubos de modo que dichos bloques, una vez formados, sólo tienen que ser "colocados" en la sección correspondiente. Sin embargo, y esto es importante, debe aclararse que el diseño de las barras radiales se hizo considerándolas, no como elementos independientes, sino como parte de toda la estructura. Esto implica que las barras radiales no son capaces de soportar el peso de un bloque si no cuentan con un apoyo en el extremo opuesto al eje. Es decir, si se les hace trabajar como viga en voladizo, no resisten la carga ejercida por los bloques. Tomando muy en cuenta lo anterior, el ensamble de los bloques, una vez armada la estructura, requiere especial atención.

El proceso de ensamble, a pesar del inconveniente mencionado, es extremadamente simple, sólo es indispensable que el montaje de los bloques se realice empezando por la sección inferior y terminando con la superior, teniendo cuidado en todo momento de dar apoyo a los extremos de las barras radiales por medio de los cinturones. El desmontaje, por el contrario, debe comenzar por el bloque superior y así sucesivamente hasta terminar con el inferior.

## Conclusiones

A continuación se detallan las ventajas y desventajas del equipo de limpieza de aguas residuales que se propone respecto al sistema de biodiscos utilizado actualmente.

Una de las ventajas de este equipo es su flexibilidad para adaptarse tanto a las necesidades existentes en pequeñas comunidades, como al tratamiento de desechos industriales, ya que es un sistema modular que permite instalar únicamente los módulos requeridos de acuerdo a la población que vaya a atender, y puede ir creciendo junto con ella, añadiéndose más módulos.

El problema causado por la dependencia de un solo fabricante de las láminas de plástico está resuelto, dado que una gran cantidad de fábricas son capaces de extruir los tubos que se requieren para el sistema, además el costo del dado de extrusión se justifica fácilmente debido a la gran cantidad de metros de tubo que se deben extruir.

Actualmente se está fabricando el primer prototipo, el cual se pondrá en operación en la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria. Este prototipo tiene un área de  $516 \text{ m}^2$  y una densidad de área de aproximadamente  $146 \text{ m}^2/\text{m}^3$  y se le realizarán las pruebas necesarias para comprobar su correcto funcionamiento y posteriormente hacer los ajustes adecuados para licenciar la tecnología a alguna empresa interesada.

Cabe aclarar que la densidad de área de contacto del nuevo sistema respecto a su principal competidor, los biodiscos, no se incrementó en la magnitud que se había considerado inicialmente; sin embargo, dicha densidad es aproximadamente 15% mayor respecto a los biodiscos.

Por otra parte, si se compara la relación de masa de polietileno respecto al área de contacto, esta relación es de  $1.39 \text{ kg}/\text{m}^2$  para el nuevo sistema; y de  $0.48 \text{ kg}/\text{m}^2$ , para los biodiscos. Esto podría considerarse como una gran desventaja del sistema propuesto, pues implica que se requiere de tres veces más material plástico para generar la misma área de contacto respecto a los discos.

Se pudo inferir, consultando directamente a algunos fabricantes, que el costo por metro cuadrado de área de contacto en los tubos es menor que la misma relación para los discos.

Además, es posible reducir los costos de fabricación en el caso de los tubos, modificando el diseño del dado de extrusión, de modo que éste produzca bloques de tubos en lugar de tubos individuales. Este cambio en el dado de extrusión permite aumentar el área de contacto si el espesor de las paredes extruidas se reduce de  $1/8''$  (espesor actual al unir dos tubos) a  $1/16''$  en un dado multitubular (*sic*).

Con los argumentos del párrafo anterior es posible aseverar que el nuevo sistema tiene amplias posibilidades de resultar económicamente más rentable que los biodiscos, a pesar que la densidad de área de contacto lograda para los tubos no supera en gran medida a los discos.

Otra ligera desventaja del nuevo sistema respecto a los biodiscos se refiere a la generación de ruido, directamente vinculada con el desalojo del agua y su contacto con la del tanque. Es importante aclarar, que lo anterior no significa que el nivel de ruido generado por el sistema de tubos sea de una magnitud tal que impacte al medio ambiente; de hecho, se prevé que una vez colocada la cubierta del sistema, el ruido será apenas perceptible a unos cuantos metros del mismo.

Normalmente, los sistemas modulares pueden crecer tanto en serie como en paralelo. En el caso del sistema propuesto, el crecimiento en serie no es conveniente llevarse a cabo si la instalación de los nuevos módulos se plantea sobre el mismo eje axial. La razón es simple, como el sistema está inclinado, un eje excesivamente largo implica que el extremo superior de éste se aleje considerablemente de la superficie libre del líquido en el tanque, provocando a su vez una disminución en el área de contacto. Por lo anterior, es necesario que al instalarse nuevas etapas en serie, cada una de ellas cuente con ejes independientes que pueden ser interconectados por medio de sistemas de engranes que permitan la transmisión de potencia entre ejes adyacentes. Esta característica permite que el sistema siga trabajando a pesar de que una de las etapas requiriera ser desmontada para su reparación.

Los sistemas de tratamiento biológico requieren que el tanque sea limpiado periódicamente. En el caso de biodiscos, debido a la configuración de los sistemas, el mantenimiento descrito implica detener por completo el sistema para que pueda ser desmontado del tanque. El desmontaje del equipo, en el caso de los discos, requiere de gran cantidad de tiempo, pues cada sección, de cada disco, debe ser desmontado individualmente, después cada etapa y así sucesivamente. En el sistema de tubos propuesto, el tiempo de paro del sistema para trabajos de mantenimiento se reduce considerablemente pues permite desmontar por bloques. Esta característica no sólo es conveniente en trabajos de mantenimiento del tanque, sino también cuando sea necesaria la sustitución de bloque dañados; situación que dicho sea de paso, es poco probable que se presente.

Como último comentario, hay que decir que los cálculos para el estado de cargas y esfuerzos del sistema fue realizado prácticamente a mano. Es por todos sabido que existen potentes programas de simulación que trabajan por medio de análisis por elemento finito. El uso de este tipo de programas, además de facilitar el análisis, reduce considerablemente el tiempo requerido para los cálculos de sistemas complejos. Por esto último, se recomienda que de ser necesario realizar más cálculos para el rediseño de este sistema, se considere la posibilidad de utilizar medios computacionales.

## Bibliografía

1. BEER & JOHNSTON. "Mecánica de materiales". Ed. McGraw-Hill, 2da. Edición, Colombia, 1993. TA405/B44"
2. COLLADO, Lara Ramón. "Depuración de aguas residuales en pequeñas comunidades". Ed. Paraninfo, 1ra. Edición, España, 1992. TD760/C65
3. FAIRES, Virgil Moring. "Diseño de elementos de máquinas". Ed. Uteha, 4ta. Edición, España, 1970. TJ230/F282
4. FERRERO, José H. "Depuración biológica de las aguas". Ed. Alhambra, 1ra. Edición, España, 1974. TD430/F46
5. HAMMER, Mark J. "Water and waste-water technology". Ed. John Wiley & Sons, 2da. Edición, Canadá, 1986. TD735/H34
6. HIBBELER, Russell C. "Mecánica de materiales". Ed. CECSA, 1ra Edición, México, 1995. TA405/H53
7. JOSA, Castells Fernando. "Los recursos de agua y la lucha contra la contaminación". Artículo tomado de: "Técnica y obras de ingeniería sanitaria". organizado por la revista "Materiales maquinaria y métodos para la construcción". Editores Técnicos Asociados S. A., 1ra. Edición, España, 1973. TD157/T4
8. JUVINALL, Robert C. "Fundamentos de diseño para ingeniería mecánica". Ed. Limusa, 1ra Edición, México, 1991. TJ230/J87
9. MARKS' STANDARD HANDBOOK FOR MECHANICAL ENGINEERS; y otros. "Manual del ingeniero mecánico". Ed. McGraw-Hill, 9na. Edición, México, 1996.
10. MASTERS, Gilbert M. "Introduction to environmental engineering and science". Ed. Prentice Hall, 1ra. Edición, E. U. A., 1991. TD145/M37
11. McGHEE, Terence J. "Water supply and sewerage". Ed. McGraw-Hill, Series in water resources and environmental engineering, 6ta. Edición, E. U. A., 1991. TD345/M34

12. METCALF & EDDY, INC. "Waste water engineering. Treatment/Disposal/Reuse". Ed. McGraw-Hill, Series in water resources and environmental engineering, 2da. Edición, E. U. A., 1979. TD645/M47
13. MIROLIÚBOV, S. Engálichev, y otros. "Problemas de resistencia de materiales". Ed. Mir Moscú, 2da. Edición, U.R.S.S., 1975. TA407.4/M55
14. MOTT, Robert L. "Diseño de elementos de máquinas". Ed. Prentice Hall, 2da. Edición, México, 1992.
15. MOTT, Robert L. "Resistencia de materiales aplicada". Ed. Prentice Hall, 3ra. Edición, México, 1996.
16. NYER, Evan K. "Groundwater treatment technology". Ed. Van Nostrand Reinhold, 2da. Edición, E. U. A., 1992. TD426/N94
17. PEAVY, Howards S.; y otros. "Environmental engineering". Ed. McGraw-Hill, Series in water resources and environmental engineering, 1ra. Edición, E. U. A., 1985. TD145/P43
18. RAMALHO, R. S. "Tratamiento de aguas residuales". Ed. Reverté, 1ra. Edición, España, 1993. TD745/R3518
19. RAMOS, Carpio M. A.; y otros. "Ingeniería de los materiales plásticos". Ediciones Días de Santos S. A., 1ra. Edición. España, 1988. QD281.P6/R35
20. REYNOLDS, Tom D. "Unit operations and processes in environmental engineering". PWS Publishing Company, 2da. Edición, E. U. A., 1982. TD145/R50
21. RIGOLA, Lapeña Miguel. "Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales". Ed. Marcombo, 1ra. Edición, España, 1989. TD430/R54
22. WHITE, Frank M. "Mecánica de fluidos". Ed. McGraw-Hill, 1ra. Edición, México, 1979. TA357/W447
23. WINKLER, Michael A; y otros. "Tratamiento biológico de aguas de desecho". Ed. Limusa, 1ra. Edición, México, 1994. TD755/W5518

---

<sup>^</sup> La clave indicada en cada referencia corresponde a su colocación en bibliotecas de la UNAM.