

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE BIOTECNOLOGÍA

TÍTULO DEL TRABAJO:

DISEÑO DE UN FOTOBIORREACTOR PARA MICROALGAS

INFORME TÉCNICO DE LA OPCIÓN CURRICULAR EN LA MODALIDAD DE:

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO BIOTECNÓLOGO

PRESENTA:

GUILLERMO CUARTO NOVERÓN NAVA

ASESOR INTERNO: DR. JUAN SILVESTRE ARANDA BARRADAS

México, D. F. a 12 de Junio de 2009

Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	4
Conceptos básicos.....	4
2. JUSTIFICACIÓN.....	7
3. OBJETIVOS.....	9
4. METODOLOGÍA DE DISEÑO.....	10
4.1 Selección de tipo de fotobiorreactor.....	10
4.2 Dimensionamiento.....	11
Selección de la configuración geométrica.....	11
Relaciones geométricas.....	11
Selección de tapas.....	12
Ecuaciones usadas para el cálculo de dimensiones.....	13
4.3 Diseño del sistema de aireación.....	15
Modelos hidrodinámicos.....	15
Cálculo de la potencia suministrada.....	17
Consideraciones de criterios cinéticos.....	18
Estimación del coeficiente de transferencia de CO ₂	18
Diseño de aspersor.....	20
Diseño de tubo de arrastre.....	21
4.4 Diseño del sistema de iluminación.....	22
4.5 Diseño mecánico.....	22
Materiales de construcción.....	23
Estimación del espesor del tanque, tubo de arrastre y tapas.....	23
Especificaciones de puertos y boquillas.....	25
Especificaciones de los sistemas de sujeción y estructuras de soporte.....	26

Tubo de arrastre.....	26
Tapas.....	27
Soporte externo.....	27
4.6 Equipo auxiliar.....	28
Capacidades requeridas de equipos auxiliares.....	28
Equipos auxiliares recomendados.....	29
4.7 Instrumentación.....	29
Sensores.....	30
Instrumentación en líneas y equipo auxiliar.....	30
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
5.1 Dimensionamiento del biorreactor.....	32
5.2 Diseño del sistema de aireación.....	34
5.3 Diseño mecánico.....	39
Diseño del sistema de iluminación.....	39
Diagramas mecánicos.....	41
6. CONCLUSIONES	52
7. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.....	53
8. NOMENCLATURA.....	53
9. BIBLIOGRAFÍA.....	54
10. ANEXOS.....	56
10.1 Resultados del simulador.....	56

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los microorganismos fotosintéticos han sido objeto de estudio debido a su gran potencial de aplicación de sus derivados, los cuales son en varios casos de un alto valor agregado; lo anterior lleva al desarrollo de sistemas que permitan el óptimo desarrollo de dichos organismos para posterior obtención de sus derivados. Es motivo del presente trabajo el desarrollo de un método de diseño y con ello el diseño particular de un fotobiorreactor para el cultivo de microorganismos fotosintéticos. Dicho diseño, se establece para ser funcional en el cultivo de microalgas y otros microorganismos fotosintéticos, con la finalidad de mejorar los procesos de cultivo experimental.

Debido a que *Spirulina* es uno de los organismos de este tipo que están mas estudiados y se tienen reportes de diferentes condiciones de cultivo, será el organismo modelo para el diseño del fotobiorreactor aquí establecido; lo anterior no significa que no podrá ser usado para el cultivo de otros ,microorganismos, esto considerando que el diseño se contempla para ser "flexible" en el sentido de que se podrán modificar varias condiciones en el cultivo, tales como la aireación, la intensidad luminosa, longitudes de onda, variaciones de distanciamiento entre la fuente luminosa y el biorreactor.

Se plantea el diseño de un sistema para el correcto cultivo de microalgas y otros microorganismos fotosintéticos, tal diseño se realiza considerando los requerimientos generales de dichos organismos. Las consideraciones también van orientadas a lo requerido en el laboratorio, es decir al vacío existente de sistemas con la versatilidad de diseño para el cultivo de diversos microorganismos.

Conceptos Básicos

Un biorreactor es un recipiente o sistema que mantiene un ambiente biológicamente activo; también se le puede llamar así, a un recipiente en el que se lleva a cabo un proceso químico que involucra organismos o sustancias bioquímicamente activas derivadas de dichos organismos. En los biorreactores se busca mantener las condiciones ambientales propicias (pH, temperatura, concentración de oxígeno, dióxido de carbono, etcétera) para el óptimo desarrollo del metabolito de interés.

Un fotobiorreactor es un recipiente, o sistema de recipientes, iluminados de forma natural o artificial, en los cuales se realizan cultivos de microorganismos fotosintéticos, se

pretende que estos cultivos se realicen de manera controlada y bajo condiciones que propicien un óptimo crecimiento del microorganismo.

ORGANISMOS FOTOSINTÉTICOS

Las microalgas son consideradas como los primeros microorganismos fotosintéticos y responsables en gran medida de la atmósfera terrestre. Sin bien existen muchas especies distintas, algunas de ellas, absorben dióxido de carbono del aire y nutrientes del agua (sales), acumulando en su interior importante cantidad de proteínas y aceites; y liberan oxígeno a la atmósfera.

Las aplicaciones productivas y comerciales de las microalgas son tan diversas como numerosas son las especies que integran este grupo de organismos. Sus usos van desde la producción de alimentos para consumo humano hasta la producción de hidrógeno con aplicaciones energéticas. "Son organismos apenas explorados, que en la actualidad son objeto de intensas investigaciones para la búsqueda de nuevas sustancias bioactivas susceptibles de ser utilizadas en medicina o de nuevos usos productivos como la biorremediación ambiental o la elaboración de biocombustibles".

Las cianobacterias fueron designadas durante mucho tiempo como cianófitas (*Cyanophyta*, literalmente *plantas azules*) o cianofíceas (*Cyanophyceae*, literalmente *algas azules*), castellanizándose lo más a menudo como **algas verde azuladas**. Cuando se descubrió la distinción entre célula procariota y eucariota se constató que éstas son las únicas algas procarióticas, y el término *cianobacteria* (se había llamado siempre bacterias a los procariontes conocidos) empezó a ganar preferencia. Los análisis genéticos recientes han venido a situar a las cianobacterias entre las bacterias gram negativas; son organismos que debido a su gran diversidad morfológica y fisiológica sintetizan gran cantidad de metabolitos con aplicación biotecnológica, como lo son los exopolisacáridos, las ficobiliproteínas, los carotenoides, los ácidos grasos, proteínas y vitaminas; también se han usado como fuente nutricional en animales y humanos, en la industria cosmética y como biofertilizantes; han tenido incidencia en el tratamiento de aguas residuales como adsorbentes de metales pesados, lo cual demuestra la amplia gama de aplicaciones que tienen en beneficio de la humanidad y el ambiente.

La Spirulina (ó *Arthrospira*) es una bacteria perteneciente al grupo Cyanobacteria (anteriormente conocido como Cyanophyta o como grupo de las algas verdeazules). Se

trata de organismos unicelulares y fotoautótrofos, a pesar de ser unicelulares se agrupan formando tricomas o formas filamentosas. Realmente se trata de organismos procariotas, y no de algas como se creía anteriormente. Poseen una región central, donde se localiza el ácido nucleico (una sola molécula de ADN), una región periférica que contiene las membranas tilacoidales y varias inclusiones o estructura citoplasmáticas, rodeada frecuentemente por una capa de mucílago. Dicha capa no está presente entre las células que forman el tricoma. La pared celular contiene peptidoglucano y la estructura y composición características de las bacterias Gram negativas.

2. JUSTIFICACIÓN

El mercado mundial de productos derivados de microalgas, está constituido por una amplia gama de productos con componentes bioactivos empleados en beneficio del ser humano, e incluso tal beneficio repercute en el medio ambiente, de manera positiva.

Sin embargo, aun falta mucho por desarrollar, para aprovechar todos los beneficios de este tipo de microorganismos, por ello, es necesario dirigir esfuerzos a proyectos como este, que pretenden usar al máximo los beneficios de estos organismos

Existen tres grandes campos de aplicación de productos derivados de microalgas y microorganismos fotosintéticos:

Potencial en el área alimenticia

La creciente demanda de los denominados alimentos funcionales (aquellos que además del aporte nutritivo “clásico” son capaces de producir beneficios en la salud de los consumidores) ha puesto de manifiesto la necesidad de encontrar otras opciones naturales de este tipo de ingredientes.

Las microalgas se han revelado como una posible alternativa al empleo de fuentes sintéticas. Spirulina es una microalga cuyo consumo se remonta a la América precolombina y es productora de antioxidantes (carotenoides, xantofilas) y compuestos antimicrobianos (polisacáridos, ácidos grasos), entre otros.

Potencial en el área energética

La fabricación de biocombustibles como el bioetanol a partir de la fermentación de maíz / caña de azúcar o la de biodiesel a partir de aceites como el de soja u otros cereales, no puede dar respuesta a la demanda global de combustible con sustentabilidad ambiental y económica. Las tierras aptas para siembra son limitadas, las cosechas están sujetas a variables climáticas y no es razonable, ante el incremento de la población mundial, utilizar alimentos en la producción de combustibles o tierras aptas para sembrar materias primas alternativas.

Algunas microalgas como la *Botryococcus braunii*, la *Nannochloropsis sp.* y la *Schizochytrium sp.*, en determinadas condiciones producen más de un 65% de aceite.

Potencial en el área farmacéutica

En el campo de la tecnología farmacéutica, el glicerol es un disolvente ampliamente utilizado en virtud de sus propiedades físico-químicas en la formulación de diferentes formas farmacéuticas.

El glicerol puede ser obtenido de lípidos complejos, por síntesis orgánicas, mediante la fermentación de los carbohidratos o a partir de derivados sintéticos resultantes de la refinación del petróleo. Tomando en consideración el aumento del precio de las materias primas utilizadas tradicionalmente para su obtención, se impone la búsqueda de nuevas y variadas fuentes.

En este sentido, el perfil lipídico de las microalgas se caracteriza por la presencia de cantidades apreciables de lípidos neutros, principalmente glicéridos, que representan una fuente potencial de glicerol, además de haberse informado la existencia de glicerol libre en las células de un número considerable de especies. La microalga marina *Dunaliella salina* (Chloropyta, Chloropyceae) contiene cantidades significativas de glicerol, que pueden incrementarse en respuesta a un aumento de la presión osmótica externa.

Por otro lado, se encuentra el gran potencial de las ficobiliproteínas, como tratamientos alternativos ante enfermedades como el cáncer, o para el uso en laboratorio (por ejemplo en inmuno-ensayos) las ficobiliproteínas son pigmentos que podemos encontrar en ciertos organismos, tal es el caso de las cianobacterias y microalgas, como ejemplos de estos organismos tenemos a *Spirulina* sp, que contiene ficocianina en buena proporción, y que su extracción resulta relativamente fácil.

3. OBJETIVOS

- Diseñar un fotobiorreactor en el que se puedan cultivar microalgas y otros microorganismos fotosintéticos.
- Establecer una secuencia de cálculo basada en la transferencia de masa (CO_2) y en la hidrodinámica del medio líquido para el dimensionamiento del fotobiorreactor.

4. METODOLOGÍA DE DISEÑO

Se entiende por diseño a la actividad de la ingeniería, en la cual, se pretende dar solución a problemas dados, ya sea que estos problemas no cuenten con una solución, o que la que exista pueda ser mejorada. Dado que el diseño es un proceso creativo, y además para el presente trabajo es un proceso de ingeniería, requiere entonces del uso de iteraciones de cálculo. Luego entonces el método de diseño permite establecer de manera secuencial las etapas requeridas para el proceso de diseño. De este modo, se plantea el método de diseño del fotobiorreactor tipo airlift. El presente trabajo, incluye los conocimientos científicos e ingenieriles, en los cuales se sustenta el mismo.

4.1 Selección del tipo de fotobiorreactor

Una parte fundamental en el desarrollo de un bioproceso, es el diseño de biorreactores, en este caso el de un fotobiorreactor; es común el uso de fotobiorreactores tubulares en el cultivo de organismos fotosintéticos, incluso el cultivo a cielo abierto en contenedores donde se tiene poco o nulo control sobre las condiciones de cultivo. Existe una gran variedad de fotobiorreactores para el cultivo de organismos fotosintéticos, y son diseñados de esta manera, pues es fácil satisfacer las demandas de luminosas requeridas por los organismos, además que su construcción resulta sencilla. Aunque los diseños comúnmente usados tienen sus grandes desventajas, como el hecho de tener poco control sobre las condiciones de cultivo (pH, T, CO₂, e incluso variaciones de la intensidad luminosa) que evidentemente repercuten en la calidad de los metabolitos de interés.

Existen otras desventajas por parte de los fotobiorreactores que se usan comúnmente, tales como la falta de homogeneidad del medio, factor que resulta fundamental en el cultivo de cualquier tipo de microorganismo.

Otra consideración importante, es la operación aséptica requerida en los bioprocesos, y el cultivo de microorganismos fotosintéticos, no es la excepción, ya que aunque generalmente son de difícil contaminación por otros microorganismos, es recomendable mantener condiciones de asepsia para evitar cualquier posible interferencia de elementos extraños, cosa que resulta imposible en cultivos abiertos, por ejemplo.

Por otra parte, se tienen las ventajas que ofrece un fotobiorreactor tipo airlift, con respecto a las columnas burbujeadoras (también usadas para el cultivo organismos fotosintéticos),

el airlift tiene mayores capacidad de transferencia de masa, mayores superficiales de liquido y gas, además de tener patrones de flujo bien definidos (Chisti, 1989).

Los argumentos mencionados anteriormente, nos dan motivo de pensar que el diseño de un biorreactor tipo airlift para organismos fotosintéticos, será de gran utilidad para el uso en laboratorio, e incluso para un posible uso industrial.

4.2 Dimensionamiento

El dimensionamiento es una parte fundamental en el diseño del biorreactor, ya que para el caso del airlift, es la etapa base del diseño mecánico y a la vez, deben conocerse dimensiones generales para la estimación de sus capacidades de transferencia.

En la fase de dimensionamiento, se pretende estimar y/o calcular diámetros, áreas transversales, alturas, formas de tapas, etc.

Selección de la configuración geométrica

Existen de manera general dos configuraciones para reactores tipo airlift, los de circulación interna, y los de circulación externa (Onken y Weiland, 1983).

De las reacciones mencionadas, la más adecuada para los requerimientos de un reactor experimental, es el biorreactor de circulación interna ya que nos permitirá el multiuso haciendo modificaciones mecánicas sencillas (intercambio de aspensor y tubo interno). A su vez, es de fácil limpieza y mantenimiento aséptico.

Relaciones geométricas

Buena parte del conocimiento sobre la construcción de biorreactores, es de origen empírico, de tal modo que existen recomendaciones para el uso de relaciones geométricas, que optimizan el tiempo de mezclado y transferencia de masa del reactor. De forma general, para reactores de escala que va de los 10 a los 5000 litros, se establecen las siguientes relaciones (Chisti, 1989; Quintero, 1991; Onken, 1983) que para fines del presente trabajo se tomaran como referencia aceptable.

Tabla 1. Relaciones geométricas generales para biorreactores airlift.

Volumen de operación (Litros)	Dr/Dd
55	0.3
10-500	$0.59 < (Dr/Dd) < 0.8$
Menor de 5000	0.6
Ht/Dd=10; Hi/Ht=0.57	

Se usa a Dd para designar el diámetro del bioreactor, Dr para el diámetro del tubo interno, Ht para la altura de la parte cilíndrica del biorreactor, y Hi para la altura del tubo interno.

Como se observará más adelante, se ha seleccionado la relación $Dr/Dd=0.5$ para el diseño del equipo, sin embargo, como fue mencionado con anterioridad, se pretende que este diseño sea flexible, de tal suerte que se podrán hacer modificaciones al tubo de arrastre y al aspensor mediante el uso de otras relaciones geométricas (0.4, 0.6, 0.7) que han sido usadas para la estimación del coeficiente de transferencia de oxígeno, que hemos tomado de referencia para fines prácticos.

Selección de tapas

Existe una variedad importante de tapas usadas para los biorreactores: planas, semiesféricas, semielíptica y toriesférica. Al seleccionar el tipo de tapas, deben considerarse las presiones interna y externa de operación a las que estarán sujetas (Sandler, 1987).

Para el caso del biorreactor airlift, es fundamental la selección de correcta de la tapa inferior, ya que en gran medida influye en la pérdida de velocidad por fricción que sufre el líquido mientras circula con forme al patrón de flujo. La tapa semiesférica proporciona una continuidad de flujo muy suave en comparación con el resto de las tapas, además, elimina la zonas muertas que se presentan en tapas planas. La forma semiesférica, proporciona una resistencia efectiva a la presión hidrostática a la que puede ser sometida.

Por las razones expuestas anteriormente, tanto la tapa inferior, como la tapa superior, serán de forma semiesférica.

Ecuaciones usadas para el cálculo de dimensiones

Se ha determinado que la escala del fotobiorreactor será de 5L de volumen de operación, esto por que en principio se pretende que el equipo sea usado a nivel laboratorio, cabe mencionar que se obedece a las relaciones descritas en la tabla 1, ya que al ser aunque el volumen elegido no esta dentro del rango descrito, se puede esperar que se conserve cierta proporción y por tanto resultados favorables.

Una vez establecido el volumen de operación (que resulta ser el volumen útil, y por tanto el de mayor interés), se puede procederla calculo de las dimensiones generales de biorreactor.

Un criterio importante a considerar, es el % del volumen útil (%V) del reactor que tras algunas iteraciones de cálculo, ha permitido establecerlo de 80% (Ver Grafica 1), de esta forma el volumen será bien utilizado y permite la ligera reducción de dimensiones del reactor.

Lo anterior nos permite establecer entonces la siguiente relación:

$$V_{op} := 0.8 \cdot V_T \quad (1)$$

En donde:

V_{op} es el volumen de operación y V_T es el volumen total del biorreactor.

También se puede establecer que el volumen total (V_T) es la suma d el volumen de la parte cilíndrica (V_c) y el volumen de las tapas (V_t):

$$V_T := V_c + V_t \quad (2)$$

Como se consideran tapas semiesféricas, entonces:

$$V_t := \frac{\pi \cdot D_d^3}{6} \quad (3)$$

El volumen de la parte cilíndrica es:

$$V_c := \frac{\pi \cdot H_t \cdot D_d^2}{4} \quad (4)$$

De forma que al sustituir en la ecuación (2):

$$V_T := \frac{\pi \cdot H_t \cdot D_d^2}{4} \cdot \frac{\pi \cdot D_d^3}{6} \quad (5)$$

De la tabla 1, se tiene que:

$$H_t := 10 \cdot D_d \quad (6)$$

Entonces, la ecuación (5) se transforma en:

$$V_T := \frac{10\pi \cdot D_d^3}{4} \cdot \frac{\pi \cdot D_d^3}{6} \quad (7)$$

Compactando

$$V_T := \frac{8\pi \cdot D_d^3}{3} \quad (8)$$

Igualando las ecuaciones (1) y (7), considerando que %V es el porcentaje de volumen total del reactor que es usado (en este caso 80% aunque en el cálculo se expresa como 0.8) y arreglando:

$$D_d := \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_{op}}{\%V \cdot 8 \cdot \pi}} \quad (9)$$

Del cuadro uno tenemos que:

$$H_i := 0.57 \cdot H_t \quad (10)$$

La altura total HT del reactor es:

$$H_T := H_t + D_d \quad (11)$$

Por otra parte, tenemos que la altura del líquido (HL) esta dada por:

$$H_L := \frac{D_d}{2} + \frac{4 \cdot \left(V_{op} - \frac{\pi \cdot D_d^3}{12} \right)}{\pi \cdot D_d^2} \quad (12)$$

El diámetro del tubo interno $D_r/D_d=0.5$ (tabla1)

$$D_r := 0.5 \cdot D_d \quad (13)$$

Las áreas A_r (área transversal del tubo de arrastre) y A_d (área transversal de la región anular) se definen:

$$A_r := \pi \cdot \frac{D_r^2}{4} \quad (14)$$

$$A_d := \frac{(0.64 \pi \cdot D_r^2)}{4} \quad (15)$$

El área transversal del reactor esta dada por la suma de A_r y A_d .

4.3 Diseño del sistema de aireación

Una vez establecidas las dimensiones generales del reactor, resulta conveniente establecer los sistemas de agitación y aireación, que para el presente caso, resultan unificarse ya que al inyectarse el aire produce un patrón de flujo bien definido obteniéndose con ello una agitación.

En el diseño del sistema de aireación y agitación, se requiere especificar la forma materiales y dimensiones del aspensor, así como especificar las dimensiones y materiales del tubo interno.

Es importante estimar la capacidad de transferencia de masa del reactor, para de esta manera garantizar que satisfará los requerimientos de los microorganismos a cultivar. Una manera de lograr lo anterior, es mediante la estimación del coeficiente de transferencia de CO_2 (KLa), ello con el uso de ecuaciones empíricas y modelos matemáticos.

Modelos hidrodinámicos

El uso de ecuaciones empíricas y ecuaciones sustentadas en elementos teóricos, permite obtener estimaciones de precisión aceptable, tanto de factores hidrodinámicos como de coeficientes de transferencia para el diseño de biorreactores airlift.

La velocidad superficial del gas (U_{Gr}), resulta ser una variable fundamental la operación en reactores tipo airlift, ya que una vez determinado un intervalo de variación de U_{Gr} se podrá entonces calcular el resto de las variables requeridas para el diseño.

Existe una dependencia empírica observada entre U_{Gr} y ε (Chisti, 1989, ε es la fracción total de gas retenido):

$$\varepsilon_1 := \omega \cdot U_{Gr}^F \quad (16)$$

Donde ω es dependiente de las propiedades del fluido y de la geometría del reactor y F responde al régimen del flujo involucrado, ambos parámetros se relacionan de acuerdo con:

$$\omega := \omega'' \cdot \left[\frac{g \cdot \rho L}{1 + \left(\frac{Ad}{Ar} \right)} \right]^F \quad (17)$$

Se ha encontrado que para distintos tipos de biorreactores $\omega''=0.001572(\text{s/m})^F$ y $F=0.6808$ (Chisti, 1989). Correlaciones del tipo de la ecuación (16) pueden usarse para la predicción de ε en algún sistema que se este diseñando (Merchuk, 1990).

Es posible también calcular la fracción total de gas retenido en el biorreactor hallando ε_r mediante la ecuación (18):

$$\varepsilon_r := \frac{UGr}{0.24 + 1.35(UGr + ULr)^{0.93}} \quad (18)$$

La ecuación (18) (Hills, 1976) requiere de un valor inicial de la velocidad superficial del líquido ULr ($ULr > 0.3 \text{ m/s}$ en aire agua) para el cálculo de ε_r . Proponiendo ULr se efectúa el cálculo, y se llega a una estimación final del ε_r iterativamente hasta llegar a la precisión deseada.

Sabiendo ε_r , se puede calcular la fracción de gas retenido en la sección no aireada.

$$\varepsilon_d := 0.89 \varepsilon_r \quad (19)$$

Y ambas fracciones se relacionan con la geometría del biorreactor a través de la fracción total de gas retenido ε en la ecuación (20) que puede derivarse matemáticamente, quedando como resultado:

$$\varepsilon_2 := \frac{Ar \cdot \varepsilon_r + Ad \cdot \varepsilon_d}{Ar + Ad} \quad (20)$$

Con las ecuaciones (16) y (20) es conveniente realizar un promedio aritmético para ε :

$$\varepsilon := \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} \quad (21)$$

Un modelo de circulación del líquido basado en un balance de energía en el biorreactor (Chisti, 1989), permite el uso de la siguiente ecuación (22) para el cálculo de la velocidad superficial del líquido ULr .

$$ULr := \left[\frac{2 \cdot g \cdot HD \cdot (\epsilon r \cdot \epsilon d)}{kB \cdot \left(\frac{Ar}{Ad} \right)^2 \cdot (1 - \epsilon d)^{-2}} \right]^{0.5} \quad (22)$$

En donde kB representa las pérdidas energéticas que sufre el líquido por fricción en el fondo del reactor. Existen trabajos (Bello, 1981; Chisti, 1989) han demostrado una correlación de kB con el área libre para flujo en las secciones aireada y no aireada del reactor (Ab), de la siguiente forma:

$$kB := 11.40 \cdot \left(\frac{Ad}{Ab} \right)^{0.79} \quad (23)$$

Con la ecuación (20), el cálculo de la altura de dispersión (altura del líquido aireado) HD , puede realizarse de la siguiente manera:

$$HD := \frac{HL}{1 - \epsilon} \quad (24)$$

Se usan los resultados calculados mediante las ecuaciones (18),(19),(20),(21),(23) y (24) y sustituyéndolos en la ecuación (22), se determina un valor de ULr . Si este valor se aleja por más de 0.01m/s del valor inicial propuesto para calcular ϵr , es necesario emplear otra vez la ecuación (18), con el nuevo ULr calculado, hasta iterativamente llegar a la estimación final de ϵr , ϵd , ϵ , HD y ULr con la presión fijada.

El tipo de circulación (tc) estimado también es función de UGr (Kawase, 1986):

$$tc := 7.075 \cdot HL \cdot (g \cdot Dd)^{\frac{-1}{9}} \cdot \left[1 + \left(\frac{Ad}{Ar} \right) \right]^{\frac{-1}{3}} \cdot \left[\left(\frac{Ar}{Ar + Ad} \right) \cdot UGr \right]^{\frac{-7}{9}} \quad (25)$$

Cálculo de la potencia suministrada

En los biorreactores agitados neumáticamente, el suministro de energía al sistema, para mantener condiciones de homogeneidad en el medio, así como para favorecer la

transferencia de masa y la difusión de nutrientes hacia las células de cultivo; se realiza a través de dos mecanismos termodinámicos básicos: por transferencia de momentum debida a la gran energía cinética del gas (reactores tipo jet) y por expansión isotérmica del gas (columnas burbujeadas y reactores tipo airlift) (Schügerl, 1991).

Para biorreactores tipo airlift, el cálculo de la potencia aireada que se suministra por unidad de volumen líquido (P_g/V_L) se establece en la ecuación (26) (Aranda 1995).

$$\frac{P_g}{V_L} := \rho_L \cdot g \cdot \frac{U_{Gr}}{1 + \frac{A_d}{A_r}} \quad (26)$$

Consideraciones de criterios cinéticos

Es necesario considerar el comportamiento de crecimiento de los organismos para los cuales se está diseñando el fotobiorreactor, tales comportamientos se expresan en constantes cinéticas. Las constantes son requeridas para así poder predecir los requerimientos del organismo y poder satisfacerlos en forma general. A continuación se muestran las constantes de algunos microorganismos fotosintéticos de interés. Algunas de estas constantes han sido usadas para efectos de cálculo (particularmente la de *Spirulina sp.*) en diversas iteraciones.

Tabla 2 Constantes cinéticas. (Vieira, 2000)

	μ (h^{-1})	$K_L a$ teórico requerido (h^{-1})
<i>Spirulina sp.</i>	0.063	0.059
<i>Clorella sp.</i>	0.134	0.126
<i>Dunaliella Salina</i>	0.08	0.075
<i>Scenedesmus sp.</i>	0.059	0.055

Estimación del coeficiente de transferencia de CO_2

Con los modelos que se han propuesto anteriormente pueden realizarse la estimación de la capacidad de transferencia de oxígeno (de diseño) del biorreactor así como su

comportamiento hidrodinámico, y en función de estos cálculos establecer el diseño mecánico del sistema de aireación y agitación.

Se ha utilizado en programa computacional (Aranda, 1995) para lograr resultados precisos y confiables. De esta manera, se han calculado las estimaciones de t_c , UGr , ULr , Pg/V_L , ϵ_r , ϵ_d , ϵ , $KLa-an$ y $KLa-tu$ para distintas configuraciones geométricas posibles del reactor, teniendo como variante las relaciones Dr/Dd de 0.4 a 0.8. Los resultados de dichas estimaciones, se muestran en el capítulo 4.

Los valores de coeficiente de transferencia de CO_2 (KLa) estimados deben ser suficientes para satisfacer distintas demandas de CO_2 .

Cuando en el cultivo se vuelve una limitante la transferencia de CO_2 ($VTCO_2$), el crecimiento se vuelve dependiente de la velocidad de transferencia de CO_2 , calculada bajo la siguiente ecuación:

$$VTCO_2 := KL \cdot a \cdot (C_g - C_l) \quad (27)$$

Donde KL es el coeficiente de transferencia de masa, a es el área transferencia de masa, C_g y C_l son las concentraciones de la fase gaseosa y en el líquido respectivamente.

Para el cálculo de C_g , se puede hacer uso de la constante de Henry (H_g), de la siguiente manera:

$$C_g := H_g \cdot P_{co} \quad (28)$$

Otro factor importante es la velocidad de consumo de CO_2 (Q_{CO}), que puede expresarse en términos de concentración celular (X), la velocidad específica de crecimiento (μ) y el rendimiento de biomasa en base al CO_2 (Y_{CO}):

$$Q_{CO} := \mu \cdot \frac{X}{Y_{CO}} \quad (29)$$

Si igualamos las ecuaciones (27) y (28) y resolvemos para el KLa , tenemos:

$$KLa := \mu \cdot \frac{X}{Y_{CO} \cdot (C_g - C_l)} \quad (30)$$

De esta ecuación, puede saberse el coeficiente de transferencia de CO_2 mínimo para un cultivo, sin que el suministro de CO_2 sea una limitante. Es necesario saber la velocidad de

crecimiento, la concentración de biomasa, el rendimiento del cultivo en base al CO₂ y las concentraciones de CO₂ disuelto. Por tanto es necesario determinar el valor de cada variable o parámetro para calcular diferentes valores de KLa requeridos y hacer una comparación con los coeficientes de transferencia que ofrece el diseño del reactor.

Diseño de aspersor

Existen varios tipos de aspersor que pueden ser usados en este tipo de reactores, como los de tuberías circulares perforadas, tubos paralelos perforados, materiales porosos, etc. El aspersor puede colocarse en la región central, o en la región anular del reactor, pueden ser de distintos diámetros; sin embargo, el diámetro de la tubería debe permanecer invariable para proveer un flujo de aire determinado.

Para poder determinar el número de orificios, y el diámetro del tubo del aspersor necesario para alcanzar los valores del coeficiente de transferencia de CO₂ (KLa) anteriormente estimados, es necesario calcular el flujo de aire que se debe suministrar al reactor para lograr la velocidad superficial del gas (UGr) que permite un cierto KLa en el reactor. Así, para cada arreglo geométrico de un tubo concéntrico interno (relación geométrica Dr/Dd) se tendrá una velocidad superficial del gas con la que se llega a los valores máximos de KLa. Con estas velocidades UGr, es posible estimar el gasto másico de aire a suministrar, utilizando la siguiente ecuación (31) (Chisti, 1989):

$$G_m := \frac{M_a \cdot H_L \cdot A_r \cdot \rho_L \cdot g \cdot U_{Gr}}{R_g \cdot T_a \cdot \ln \left(1 + \frac{\rho_L \cdot H_L \cdot g}{P_h} \right)} \quad (31)$$

Donde:	UGr: velocidad superficial del gas (m/s)
Ma: masa molecular del aire (0.02897 Kg./mol)	Rg: constante universal de los gases (8.314 J/(K mol))
HL: altura del liquido (1.96 m)	Ta: temperatura de entrada del aire (308.15 K)
Ar: área de la región por donde asciende el liquido (m ²)	Pa: presión atmosférica (0.77 atm)
ρL: densidad del liquido (1000kg/m ³)	Ph: presión manométrica del reactor (Pa)
g: aceleración de la gravedad (9.8m/s ²)	Gm: gasto másico del aire (Kg./s)

La totalidad de las variables de la ecuación anterior (31) han sido determinadas, a excepción de la presión manométrica, que depende de las condiciones de operación bajo las que se esté realizando la biotransformación.

EL adecuado control del flujo de aire, exige el uso de unidades compatibles con los equipos reguladores de flujo de aire, es decir unidades de volumen por unidades de tiempo.

$$G_v := \frac{G_m}{d_a} \quad (32)$$

Donde d_a es la densidad del aire.

Debido a las dimensiones del reactor, se ha determinado el uso de aspersores de material poroso, que son comerciales, para su fácil reemplazo en caso de así requerirlo (ver especificación en el capítulo 5)

Diseño del tubo de arrastre

Existe una variedad de tubos concéntricos que han sido diseñados y usados en la operación de reactores airlift; Entre ellos, se encuentra el tubo concéntrico normal, el perforado y el construido con mamparas. La configuración del tubo concéntrico interno (tanto su geometría como su tipo) tiene una influencia notable en la fracción de gas retenida y en la transferencia de masa al medio líquido del biorreactor (Aranda, 1995). El uso de perforaciones u otros dispositivos en los tubos concéntricos ha resultado poco recomendable debido a decrementos apreciablemente significativos en ϵ y $K_L a$ (Chisti, 1989), de tal forma que el diseño del tubo concéntrico interno será realizado sin ningún tipo aditamento.

Por otra parte, la distancia óptima entre la altura del líquido y el tubo concéntrico interno, se localiza entre 0.3m y 0.5m, independientemente de la altura del biorreactor (Weiland, 1984). Al conservar este criterio, se logra una mejora importante en el tiempo de mezclado (Chisti, 1989), Sin embargo, por cuestiones de proporción y de posición del difusor (detalles en capítulo 4.3), se ha determinado usar una distancia de 15 cm.

La distancia entre el tubo de arrastre y la altura del líquido, determinan el área entre el tubo de arrastre y la tapa inferior (área libre para el flujo entre las secciones aireada y base, A_b).

$$A_b := D_t \cdot \pi \cdot D_r \quad (33)$$

Donde D_t es la distancia que existe entre el tubo de arrastre, y el fondo o base del reactor.

El área A_b repercute en la hidrodinámica del fluido ya que interviene en la estimación de pérdidas energéticas por fricción en el fondo del biorreactor.

4.4 Diseño del sistema de iluminación

Un factor determinante en el diseño de un fotobiorreactor, es la iluminación, ya que en gran medida, determina el crecimiento celular de los microorganismos fotosintéticos en general.

El diseño que aquí se propone es experimental y como ha sido mencionado, se pretende que sea un diseño en donde se puedan realizar cambios importantes en las variables de operación, y el sistema de iluminación, no es la excepción.

Se propuso un diseño con la flexibilidad en cuanto distanciamiento e intercambio de lámparas, esto con la finalidad de adaptar el reactor a distintos organismos a cultivar y para además regular la temperatura a base de la distancia entre las lámparas y el biorreactor. Para lograr lo anterior, el diseño contempla tres rieles equidistantes para la colocación de las lámparas, a distintas distancias para pruebas, y con escala graduada en cada uno de los rieles, para saber con certeza la distancia de separación entre las lámparas y el reactor.

En el capítulo 5, se muestran los planos necesarios para la construcción del sistema de iluminación, así como los pasos de construcción.

4.5 Diseño mecánico

Una parte fundamental en el diseño de equipo, es la parte mecánica en donde se detallará de forma precisa la forma y dimensiones de todas las partes del biorreactor, así como los materiales de construcción, y la instalación de todo el equipo; todo ello sin dejar de lado las condiciones para una operación segura, y las condiciones de asepsia.

Lo anterior mencionado, se condensa en diagramas y cuadros de especificación en el capítulo 5.

Materiales de construcción del fotobiorreactor

Los materiales de construcción a emplearse, deben ser pensados para que cubran con las necesidades de operación.

En biorreactores airlift, es común el uso de aceros para su construcción, sin embargo, el presente diseño es un fotobiorreactor, y por tanto exige el paso de luz para el desarrollo de los microorganismos fotosintéticos, es por ello que se requiere de un material transparente. A continuación se plantea el uso de dos tipos de materiales, y se mencionan las ventajas y desventajas de cada uno.

Tabla 3. Materiales de construcción del biorreactor.

VIDRIO		ACRILICO	
VENTAJAS	DESVENTAJAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Permite muy bien el paso de luz.	Mas costoso debido a las formas que se requieren	Fácil manipulación del material (con respecto a las formas que este puede tomar)	Se puede rayar fácilmente (limitando con ello el paso de luz)
Permite el ser lavado sin el riesgo a rayarse	Mas pesado y frágil	Mas barato Mas ligero	

Debido a las características necesarias, y a las ventajas y desventajas planteadas en la Tabla 3, se ha establecido que el tubo concéntrico interno como las tapas, deberán ser de acrílico, esto por la característica del acrílico de ser ligero, y al ser una pieza de posible reemplazo, es conveniente que así sea, además de que este material permite que sea un tubo sumamente delgado y por tanto mas funcional.

Por otra parte, el cuerpo del reactor, resulta mas conveniente diseñarlo en vidrio, ya que es una pieza que no requiere intercambio, y también es una estructura por donde se necesita el paso de luz y por ello, es necesario que sea un material que se mantenga translucido.

Estimación del espesor del tanque, tubo de arrastre y tapas

Una vez definidos los materiales de construcción, es turno de establecer los espesores de los materiales requeridos, para una operación segura.

Al tratarse de materiales frágiles, se ha determinado usar espesores sobrados para las condiciones de operación, de tal suerte, que el reactor sea más durable y resistente. Es por lo anterior, que en las variables empleadas para la siguiente ecuación (34), sobrepasan por mucho las condiciones reales del reactor.

$$t := \frac{(Pd \cdot Dd \cdot a1)}{S1 - a0 \cdot Pd} \quad (34)$$

Donde t es el espesor que se busca, S1 es el máximo estrés permitido para el material, Pd es la presión de diseño y Dd es el diámetro del reactor, a1 y a0 son coeficientes adimensionales para tanque cilíndricos (Tabla 4).

Tabla 4. Coeficientes a0 y a1. (Aranda, 1995)

	a0	a1
Estrés longitudinal	-0.2	0.25
Estrés radial	0.6	0.5

Para determinar el espesor de las tapas, se puede usar la ecuación (33) bajo algunas modificaciones.

$$tt := \frac{0.25Pd \cdot Dd}{S1 - 0.1 \cdot Pd} \quad (35)$$

Donde tt es el espesor a estimar de las tapas.

Sin embargo, por cuestiones de diseño, ese espesor se ha incrementado considerablemente en la tapa inferior, debido a las características extras de soporte, que ella debe cumplir.

En cuanto al espesor del tubo de arrastre, es conveniente que sea el mínimo, para que de esta manera el comportamiento real del reactor, sea similar al estimado y al tratarse de un material de fácil manejo, se ha determinado que su espesor deberá ser de 2 mm.

En los planos y especificaciones, se establecen las medidas y espesores recomendados para la construcción del reactor.

Especificaciones de puertos y boquillas

La instrumentación necesaria para el biorreactor, así como las conexiones que debe tener con otros equipos, determinan el número y tipo de puertos y boquillas con el que el equipo debe ser diseñado. Lo anterior, lleva a un estudio detallado de las entradas y salidas requeridas, las cuales se enlistan a continuación.

1. Suministro de aire por la tapa interior.
2. Puerto de adición de ácido y álcali.
3. Salida de aire por el domo del reactor.
4. Entrada para línea de inoculación, medio de cultivo y agua.
5. Toma de muestra (con función de drenaje).
6. Sensor de temperatura.
7. Puerto para electrodo (próximo a la unión de la tapa inferior con el cuerpo cilíndrico).

Las anteriores entradas, se distribuyen con forma con el siguiente cuadro.

Tabla 5. Inventario general de boquillas.

TAPA INFERIOR		TAPA SUPERIOR	
Boquilla	Diámetro (mm)	Boquilla	Diámetro (mm)
1	6	2	4
5	10	3	4
6	5	4	10
7	6		

Los diámetros establecidos en la Tabla 5, van acordes a las especificaciones estándar usadas en electrodos y otros equipos de medición.

En los diagramas del capítulo 5 se observa la distribución de boquillas y puertos.

Debido a los orificios necesarios, se ha incrementado el espesor de tapas y cuerpo cilíndrico de tal forma que no se vea afectada su resistencia en condiciones de operación (toda modificación, ha sido debidamente anotada en los planos del capítulo 5).

Especificaciones de los sistemas de sujeción y estructuras de soporte

Se han establecido aditamentos mecánicos para la sujeción del tubo de arrastre, tapas y para el soporte externo, a continuación, se describen las características de dichos aditamentos.

Tubo de arrastre

El soporte y sujeción del tubo de arrastre, se ha pensado de tal forma que no influya en gran medida sobre el comportamiento esperado del reactor, y que además, sea de fácil manipulación y reemplazo en caso de así requerirlo. Para la parte del soporte (instalado en la parte baja), se propone el uso de cuatro soportes verticales (Figura 1) colocados equidistantemente, que ensamblen tanto en el tubo de arrastre, como en la tapa inferior del reactor.



Figura 1. Bastón de soporte tubo concéntrico.

Sin embargo, el soporte planteado anteriormente, no es suficiente, para garantizar la estabilidad del tubo, por ello, se requiere de otros cuatro sujetores colocados de manera equidistante, ubicados en la parte superior del tubo concéntrico (Figura 2). Estos sujetores tienen un roscado que les permite el ajuste adecuado con el cuerpo del reactor

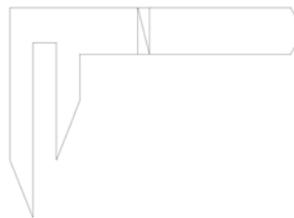


Figura 2. Sujetor del tubo de arrastre.

Tanto el soporte, como el sujetor, se propone sean construidos en Nylamid, que es un material plástico, con propiedades semejantes a las del acero, con la ventaja de no sufrir

corrosión, y otra ventaja que nos ofrece es no dañar el equipo, cosa requerida, ya que las piezas estarán en contacto con el cuerpo del reactor, que será de vidrio.

Tapas

Se ha determinado el uso de pequeñas prensas tipo c (Figura 3), para la sujeción de las tapas, tanto superiores como inferiores, cambiando entre ellas únicamente algunos detalles dimensionales y de estructura. Para el caso de la tapa superior, se ha determinado el uso de tres prensas, y para la tapa inferior, el uso de cuatro, e incluso cinco de ellas, ya que es donde se requiere mayor soporte, por el peso que se carga del reactor operando.

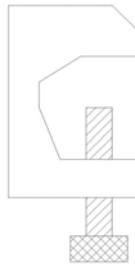


Figura 3. Prensa de sujeción para tapas.

Soporte externo

Para la estructura externa de sostén, se ha diseñado un soporte basado en tres brazos equidistantes entre si, colocados sobre un base cilíndrica, sobre esta misma base, se ha determinado montar los rieles del sistema de iluminación (Figura 4).

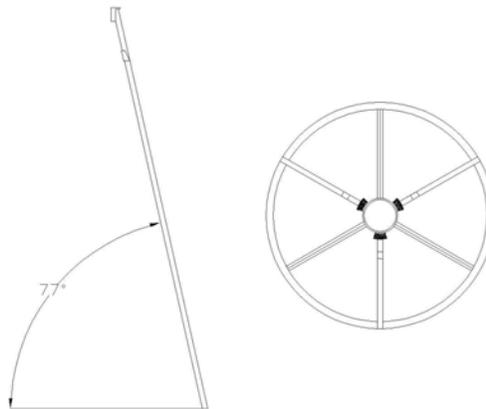


Figura 4. Soporte externo, vista de un brazo (izquierda) y vista superior total (derecha).

Los materiales que se proponen para la construcción de estos soportes, son dos, el acero y el aluminio, las dimensiones están sobradas, para que se pueda usar cualquiera de esos materiales.

Existen ventajas tanto de usar uno como otro material, en la siguiente tabla (Tabla 6), se condensan algunas de ellas.

Tabla 6. Ventajas y desventajas (acero y aluminio).

Acero		Aluminio	
<u>Ventajas</u>	<u>Desventajas</u>	<u>Ventajas</u>	<u>Desventajas</u>
Mas barato	Mas pesado	Mas ligero	Mas caro
Mas resistente	Sufre corrosión si no tiene recubrimiento	No sufre de corrosión	Muy blando

Por lo establecido en la Tabla 6, se ha determinado el uso de acero para la estructura, sin embargo, queda abierta la posibilidad del uso de otro material.

4.6 Equipo auxiliar

El diseño de cualquier equipo es incompleto si se dejan de lado los equipos auxiliares sin los cuales no podría funcionar de manera adecuada (Aranda 1995). El conjunto de los equipos auxiliares con el reactor, hacen un sistema ideal de cultivo, sin embargo, se establecerán diversos equipos alternativos ya que por si solo, el reactor no requiere de grandes aditamentos para solo ser funcional, pero hay que dejar en claro que si se quieren resultados óptimos, entonces habrá que dar uso a los equipos de mayor recomendación.

Capacidades requeridas de equipos auxiliares

Los equipos auxiliares requeridos y por ende sus capacidades, están en función de los resultados de diseño que se hallan obtenido, por ello, todas las capacidades de los equipos auxiliares deben ser establecidas conforme a los resultados obtenidos en el presente trabajo.

Equipos auxiliares recomendados

Dados los requerimientos de los organismos para los que se ha diseñado este equipo, se requiere que los equipos auxiliares, se puedan mantener en condiciones asépticas, e incluso de esterilidad, cuando el cultivo así lo requiera.

En la Tabla 7, se enlistan los equipos auxiliares, recomendados de manera general, para el óptimo funcionamiento del equipo.

Tabla 7. Equipos recomendados

EQUIPO
Tanque dosificador de ácido
Tanque dosificador de álcali
Prefiltro de aire
*Compresor de aire
*Regulador de flujo de aire

Aunque se recomienda el uso de estos equipos auxiliares, cabe mencionar, que el equipo es funcional, con los equipos marcados * y el resto del equipo puede ser sustituido por los materiales comunes de laboratorio, como matraces y vasos de precipitado.

4.7 Instrumentación

La tendencia general en el diseño de plantas, se dirige a contar con biorreactores altamente instrumentados y en el mejor de los casos, acoplados a computadoras para la adquisición y análisis de datos, control de procesos y optimización de operaciones (Kampen, 1983). Para conseguir un control sobre los procesos, es necesario, primero contar con elementos de medición que ayuden a obtener datos confiables de lo que sucede dentro y fuera del reactor.

El reactor está diseñado para la colocación y/o adaptación de elementos de medición y control, sin embargo no es motivo de este trabajo especificar el diseño de instrumentación, y únicamente se deja como una opción adicional.

Sensores

Los sensores, son elementos de medición, que pueden ser fácilmente instalados en el interior del biorreactor. Ellos pueden ser clasificados, en los que detectan variables físicas, y los que detectan cambios químicos. A continuación, se muestra un breve listado en términos generales de los sensores requeridos (debe quedar claro que nos son indispensables para la correcta operación).

Sensores de ambiente físico.

Temperatura, termistor que se acopla en serie controlador, o un elemento de platino con una resistencia acoplado a un transductor. Los electos de medición, son colocados en el termopozo.

Flujo de aire, mediante el uso de rotámetros, se pude medir el flujo de aire de entrada al reactor, el control de flujo, se hace mediante transductores, que convierten a la señal a una eléctrica, que activa un actuador, que regula el flujo.

Sensores de ambiente químico.

Sensor de pH, esta constituido de una sola unidad, que incluye las partes de medición-referencia.

Sensores de O₂ y CO₂ disuelto, ambos utilizan como medio, la medición de la presión parcial, para determinar la concentración.

Como ya fue mencionado, se ha determinado el uso de diámetros estándar, para el uso de sensores comunes y su fácil intercambio.

Instrumentación en líneas y equipo auxiliar

Para tener un control optimo del proceso, es necesario tener la mayor información en todos los puntos de este, es por ello, que tanto en líneas, como en equipos auxiliares, se ha determinado instalar instrumentos de medición y control, todos relacionados directa o indirectamente a las condiciones ideales requeridas por el biorreactor.

Se recomienda el uso de instrumentación en el equipo, ya que este permitirá la medición de variables muy valiosas, para el posible escalamiento futuro. Sin embargo, no es motivo del presente trabajo especificar la instrumentación requerida, y únicamente el diseño

contempla elementos de medición y la posibilidad de instalas elementos de control en el equipo.

5. RESULTADOS

Una vez concluidos los cálculos y los criterios de diseño, es fundamental concretar un trabajo de diseño de equipo, mediante la ayuda de diagramas, planos y resultados ordenados de manera coherente y secuencial, de manera tal que puedan ser fácilmente entendidos para la posterior construcción del sistema.

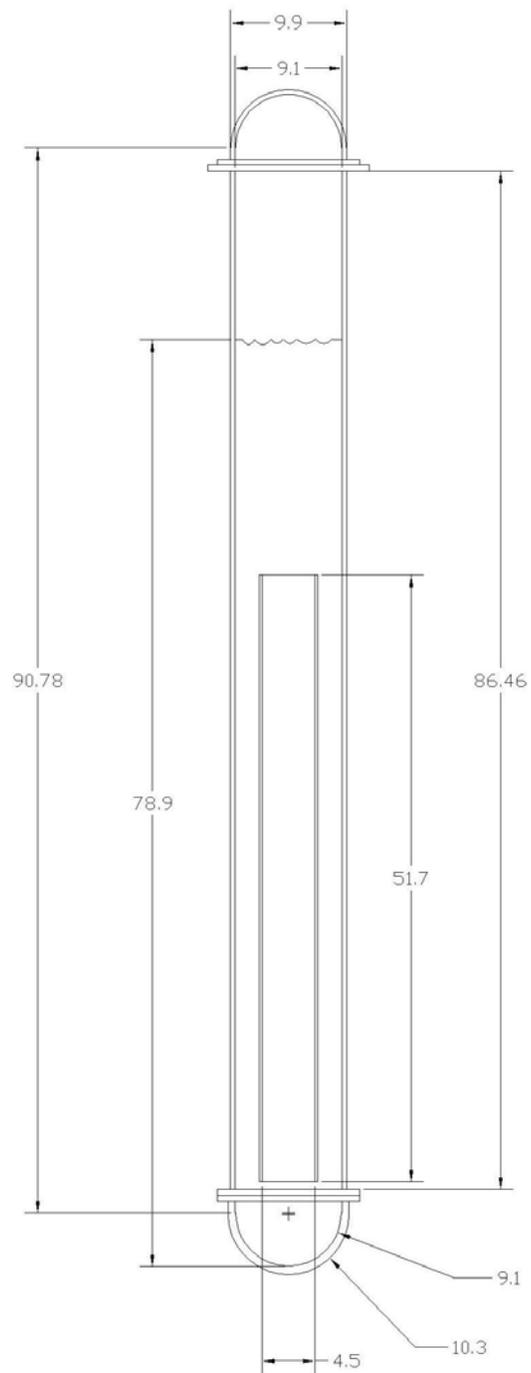
Todos los cálculos realizados, fueron de acuerdo a las ecuaciones presentadas, y las gráficas resultantes de la simulación, se lograron mediante el uso del programa computacional (Estimación de KLa para biorreactores gasosifón, Versión 1.0, Juan S. Aranda B.)

5.1 Dimensionamiento del biorreactor.

La siguiente tabla, muestra las dimensiones generales del equipo, usando, la configuración geométrica $D_r/D_d = 0.5$ y usando considerando para volumen de operación, el 80% del volumen total del tanque.

Tabla 8. Dimensiones generales, $D_r/D_d = 0.5$

Volumen de operación	Vop	5 L	Altura total	HT	0.998 m
Volumen total	VT	6.25 L	Altura del cuerpo cilíndrico	Ht	0.907 m
Volumen de las tapas	Vt	0.391 L	Altura del tubo de arrastre	Hi	0.517 m
Volumen del cuerpo cilíndrico	Vc	5.859 L	Altura del liquido	HL	0.789 m
Área transversal del tubo de arrastre	Ar	$1.615 \times 10^{-3} \text{ m}^2$	Diámetro interno del reactor	Dd	0.091 m
Área transversal del espacio anular	Ad	$1.034 \times 10^{-3} \text{ m}^2$	Diámetro interno del tubo de arrastre	Dr	0.045 m



UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE BIOTECNOLOGÍA

IPN

DIBUJO: GUILLERMO CUARTO NOVERÓN NAVA PLANO: G-01

**DIMENSIONES
GENERALES**

EQUIPO:
FOTOBIOREACTOR

ACOTACIONES:
cm

5.2 Diseño del sistema de aireación

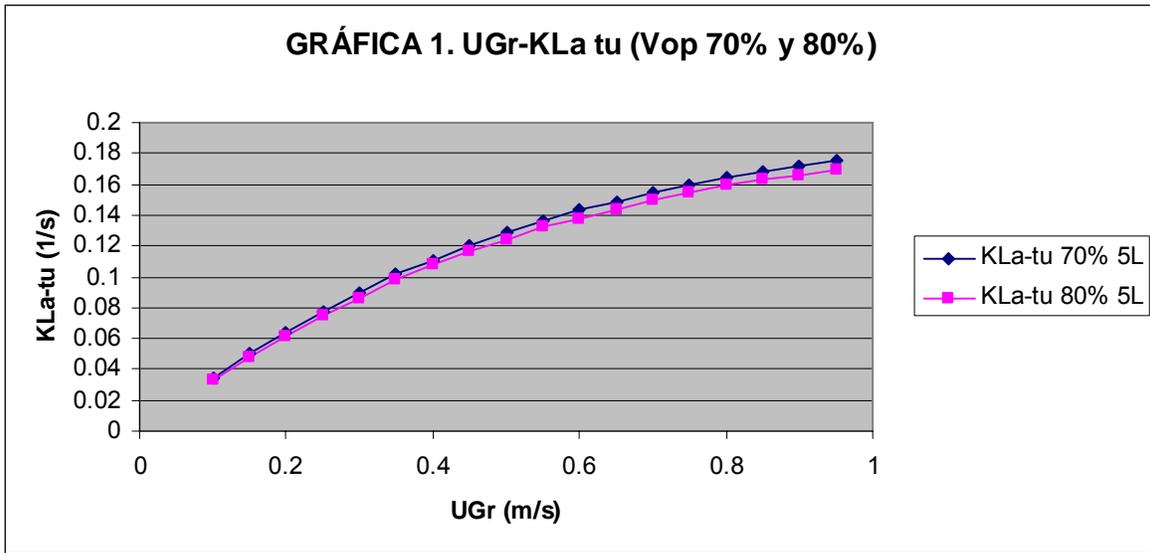
De acuerdo con los modelos analizados en el método de diseño, se estableció una secuencia de cálculo que permite estimar coeficientes de transferencia de masa, así como otras variables hidrodinámica útiles para el desarrollo del diseño. Dicha secuencia permite predecir el comportamiento del equipo bajo ciertas condiciones de simulación (propiedades fisicoquímicas del medio de cultivo, flujo de aire de alimentación, etc.) y con ello, hacer una selección mas acertada de ciertas características del reactor.

Mediante la modificación de la relación D_r/D_d , se han calculado diferentes estimaciones de KLa , lo anterior suponiendo una aireación tanto en el tubo de arrastre como en la región anular para cada configuración geométrica. El KLa calculado en la simulación, es mayor cuando el aire se inyecta por el tubo de arrastre que cuando se inyecta por la sección anular; lo anterior, nos permite entonces, basar el diseño del aspensor en uno que se encuentre en el tubo concéntrico. El tiempo de circulación prácticamente no se ve cambiado con forme a las relaciones geométricas ya que si bien hay un ligero aumento al incrementarla hasta $D_r/D_d=0.8$ la relación del diseño se estableció de $D_r/D_d= 0.5$ por tanto el buen tiempo de circulación se sigue alcanzando con el uso de esta relación. La fracción total de gas retenido ϵ prácticamente no se ve afectada en toda la gama de simulación realizada, así como también la potencia por unidad de volumen; por ello no son factores determinantes considerados para la configuración geométrica.

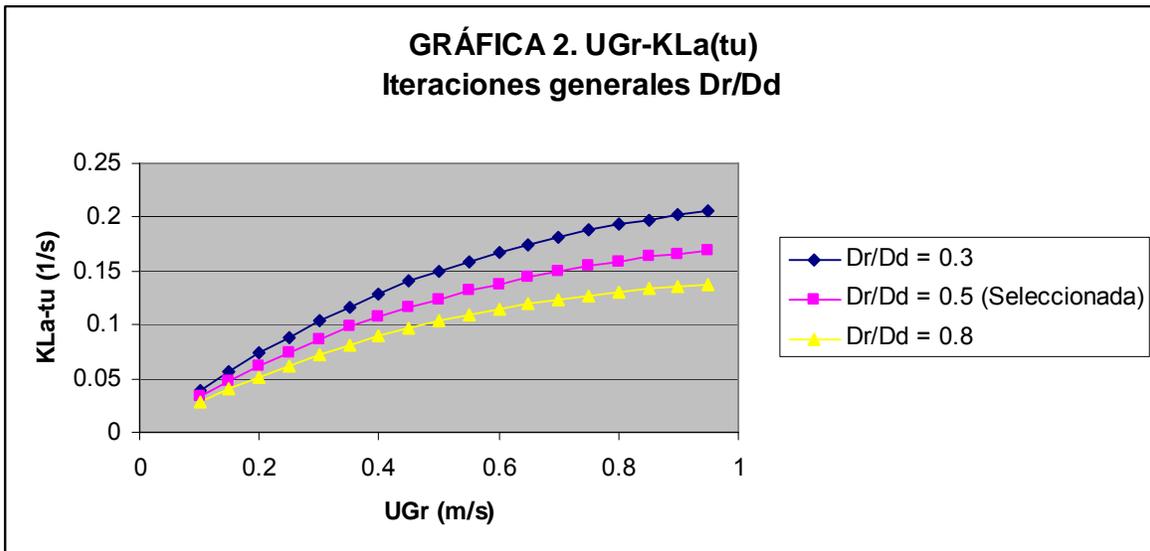
Mediante la velocidad superficial del gas UGr es posible calcular el gasto de aire, y con esta información seleccionar los aspensoros mas adecuados. En la tabla 8 de esta misma sección, se muestran los cálculos de gastos máxicos de aire, así como gastos volumétricos de diseño, derivados de diferentes valores de UGr .

Los valores de KLa obtenidos en las simulaciones, nos indican ser suficientes, para el tipo de microorganismos (microorganismos fotosintéticos) para los que ha sido diseñado el fotobiorreactor, por lo que podemos suponer que el diseño es adecuado para el cultivo de dichos organismos.

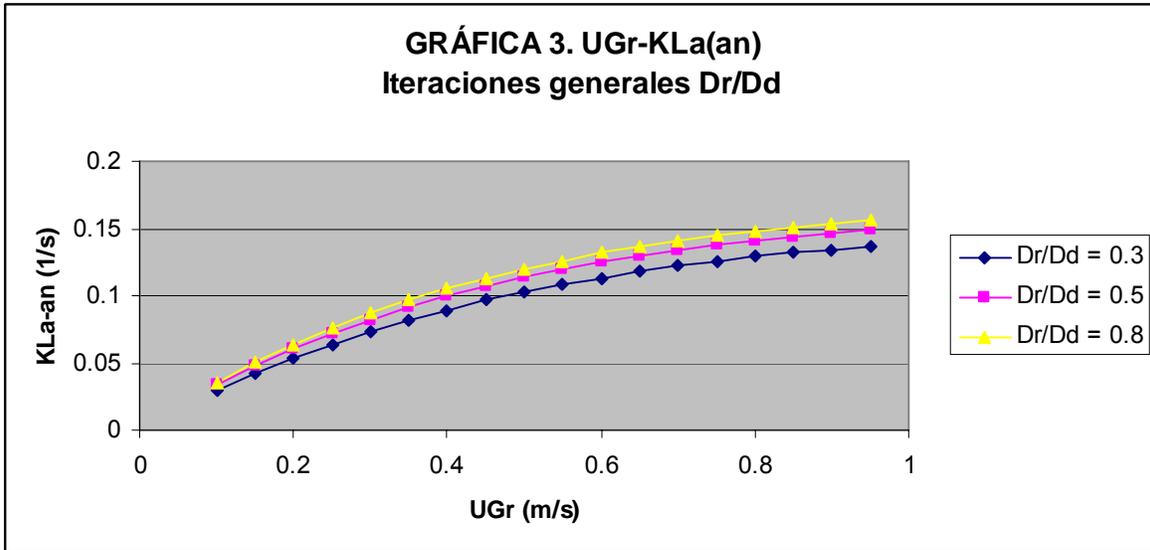
Se ha seleccionado una aspensor de material poroso de uso comercial en la sección de diagramas mecánicos (5.3) se muestran las dimensiones, y especificaciones técnicas de dicho aspensor.



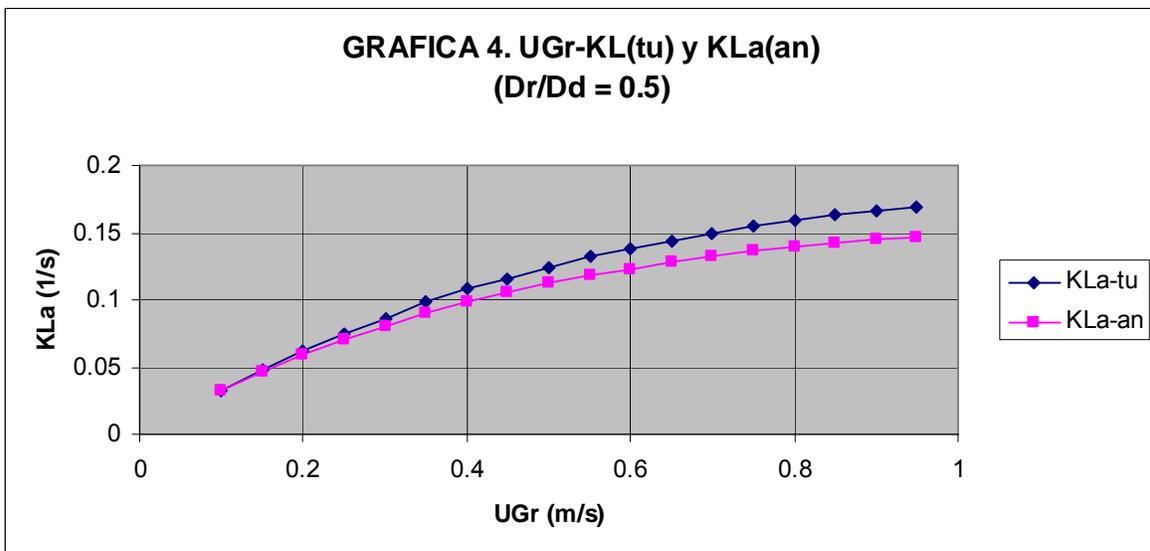
Grafica 1. UGr (velocidad superficial del gas) vs. KLa tu (coeficiente de transferencia de CO₂ en la región tubular). Se hace una comparación entre aprovechar el 70% del volumen del reactor, o usa el 80%; y se observa que el usar el 80% no repercute en gran medida a la transferencia de CO₂.



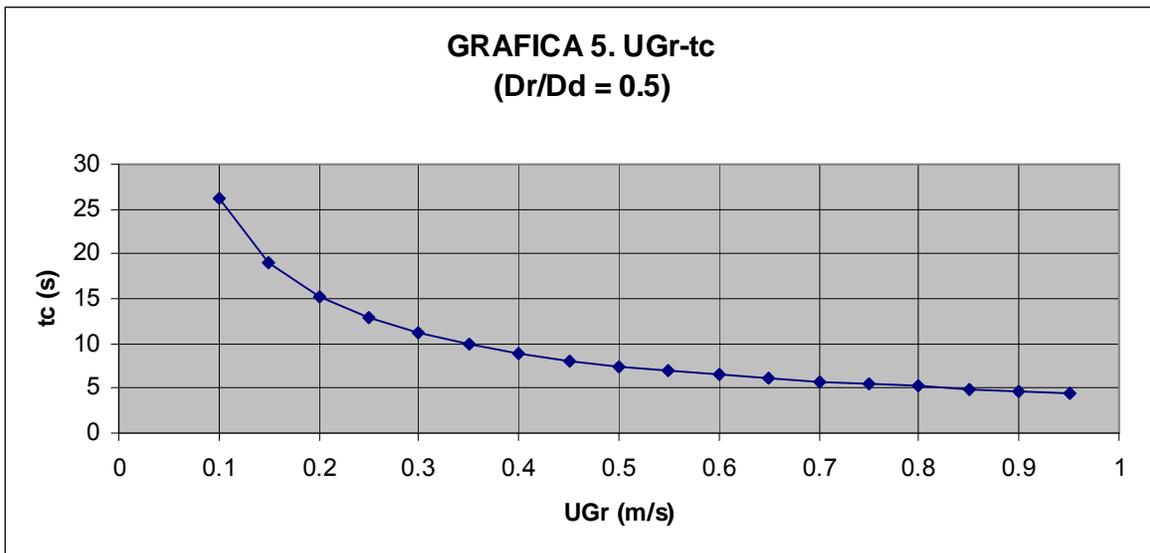
Grafica 2. UGr (velocidad superficial del gas) vs. KLa tu (coeficiente de transferencia de CO₂ en la región tubular). Se hace una comparación entre tres relaciones geométricas calculadas, y se observa que el coeficiente de transferencia de CO₂ aumenta conforme la relación disminuye; sin embargo, el uso de las relaciones geométricas Dr/Dd= 0.3 y 0.4 arrojan un diseño que complica la construcción debido a sus pequeñas dimensiones (Ver anexo 10.1).



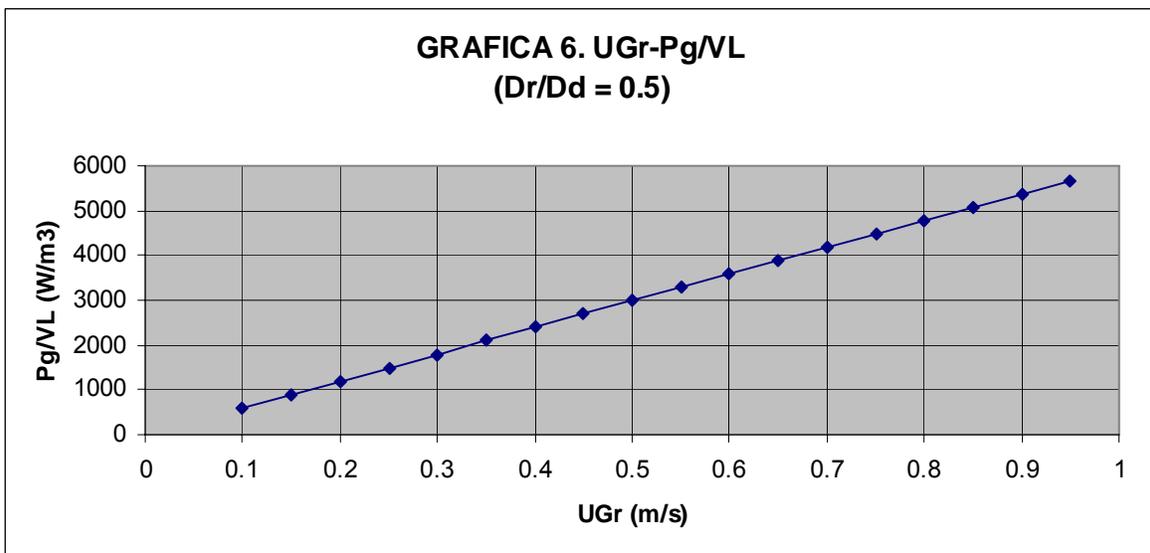
Grafica 3. UGr (velocidad superficial del gas) vs. KLa tu (coeficiente de transferencia de CO₂ en la región anular). Se hace una comparación entre tres relaciones geométricas calculadas, y se observa que el coeficiente de transferencia de CO₂ aumenta conforme la relación aumenta; sin embargo, el uso de las relaciones geométricas Dr/Dd= 0.8 y 0.7 arrojan un diseño que complica la construcción debido a que las dimensiones del tubo interno son muy grandes, complicando con ello la sujeción del mismo (Ver anexo 10.1).



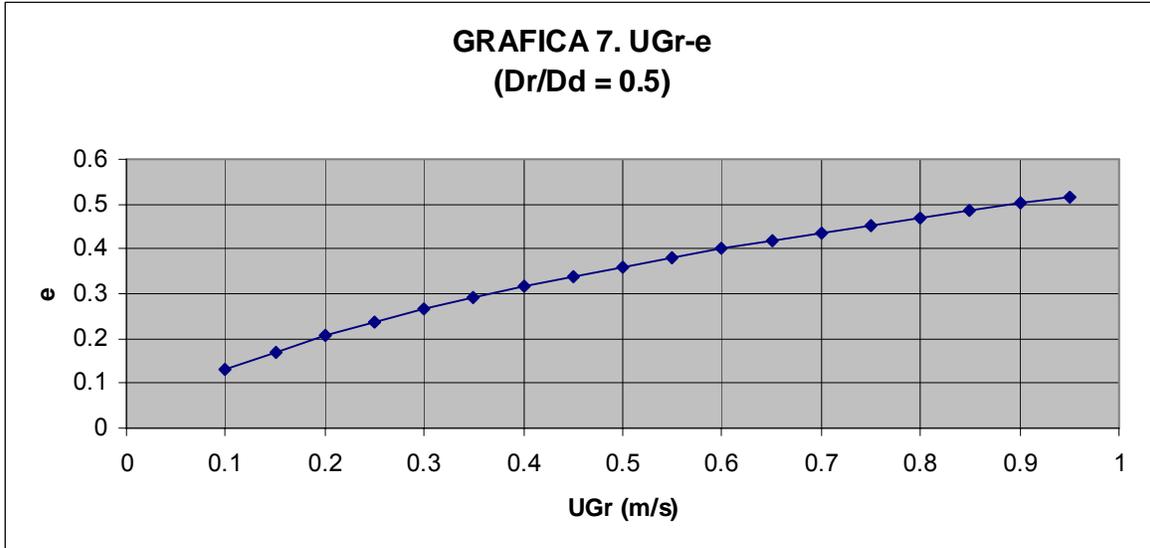
Grafica 4. UGr (velocidad superficial del gas) vs. KLa tu (coeficiente de transferencia de CO₂ en la región tubular) y KLa an (coeficiente de transferencia de CO₂ en la región anular). Se hace una comparación entre coeficientes de transferencia de CO₂ obtenidos para la relación geométrica Dr/Dd=0.5, se observa que el KLa de la sección tubular es superior al de la sección anular, esto permite determinar que resulta mas conveniente usar un difusor en la sección tubular.



Grafica 5. UGr (velocidad superficial del gas) vs. tc (tiempo de circulación). Se muestran los tiempos de circulación a distintas velocidades superficiales obtenidos de la relación geométrica $Dr/Dd=0.5$.



Grafica 6. UGr (velocidad superficial del gas) vs. Pg/VL (potencia aireada por unidad de volumen líquido). Resultados obtenidos de la relación geométrica $Dr/Dd=0.5$.



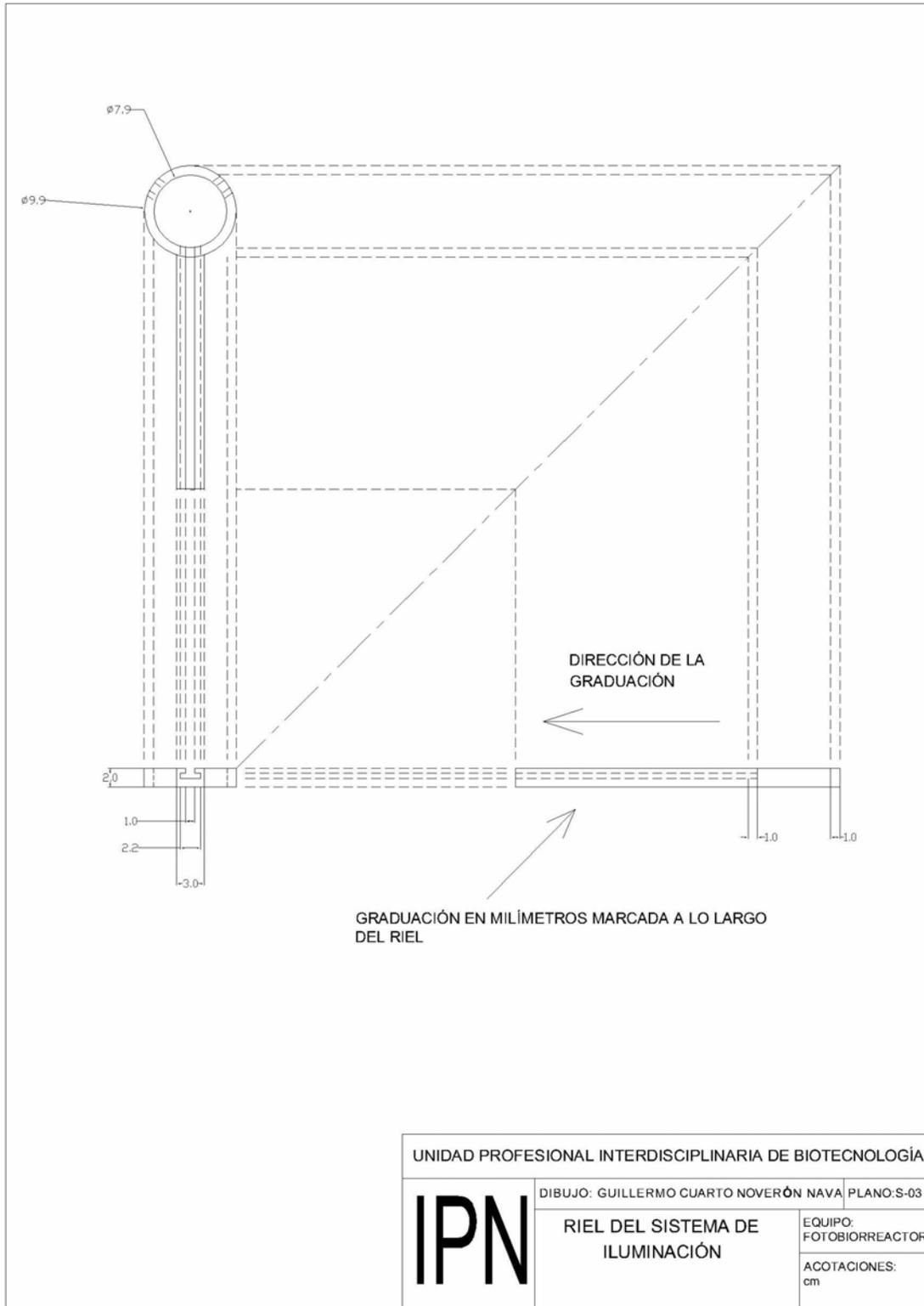
Grafica 7. UGr (velocidad superficial del gas) vs. e (fracción total del gas retenido en el líquido). Resultados obtenidos de la relación geométrica $Dr/Dd=0.5$.

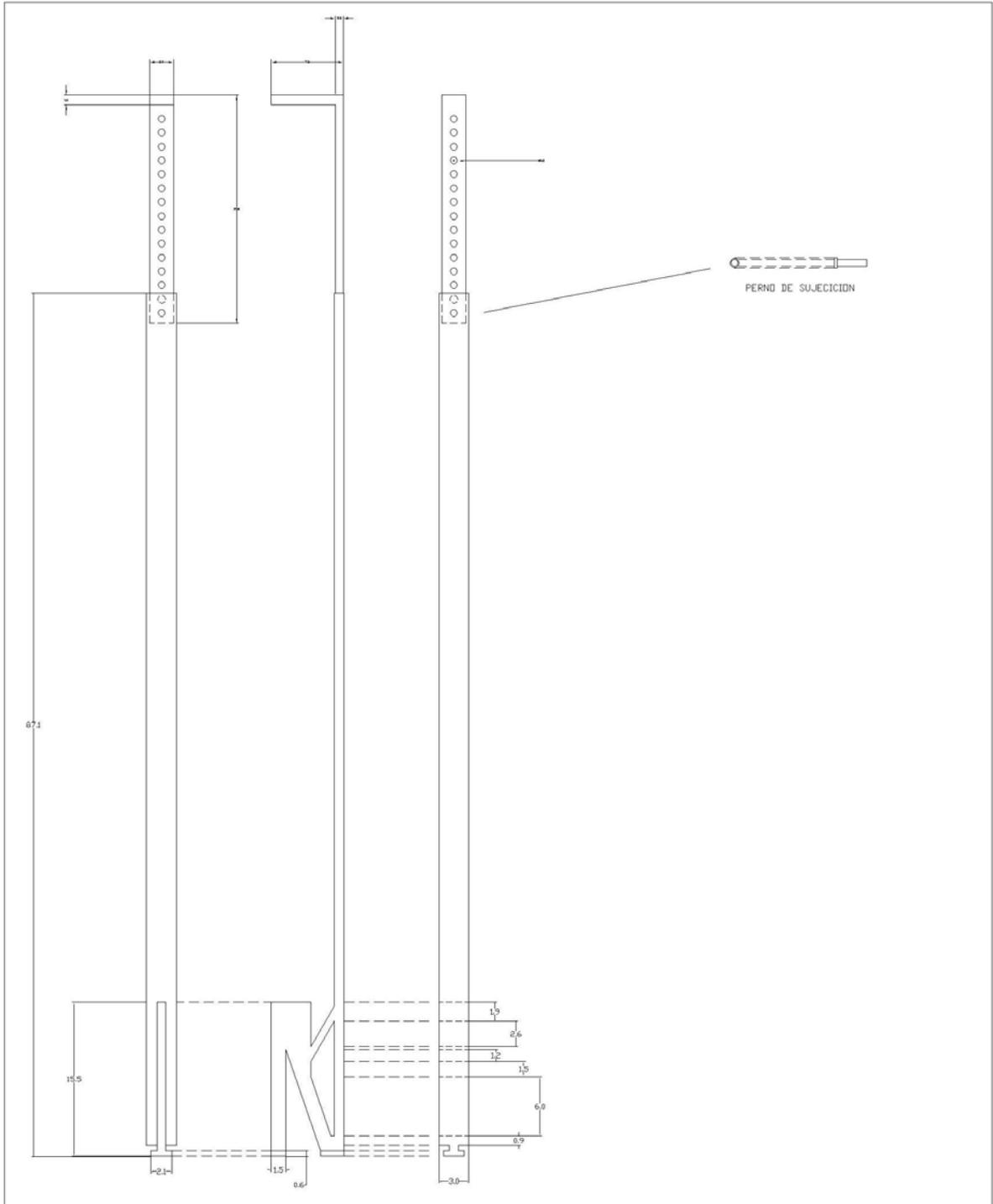
Tabla 9. Flujos de aire.

UGr (m/s)	Pa + Ph (bar)	Gm (Kg/s)	Gv (m ³ /min)
0.5	1.01bar+0.077bar	0.001031	0.048
	0.077bar	0.0001019	0.004705
0.6	1.01bar+0.077bar	0.001237	0.057
	0.077bar	0.0001223	0.005646
0.7	1.01bar+0.077bar	0.001443	0.067
	0.077bar	0.0001427	0.006587
0.8	1.01bar+0.077bar	0.001649	0.076
	0.077bar	0.0001631	0.007528
1	1.01bar+0.077bar	0.002062	0.095
	0.077bar	0.0002039	0.00941

5.3 Diseño mecánico

Diseño del sistema de iluminación.





UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE BIOTECNOLOGÍA

IPN

DIBUJO: GUILLERMO CUARTO NOVERÓN NAVA | PLANO: S-04

SOPORTE DEL
SISTEMA DE
LAMPARAS

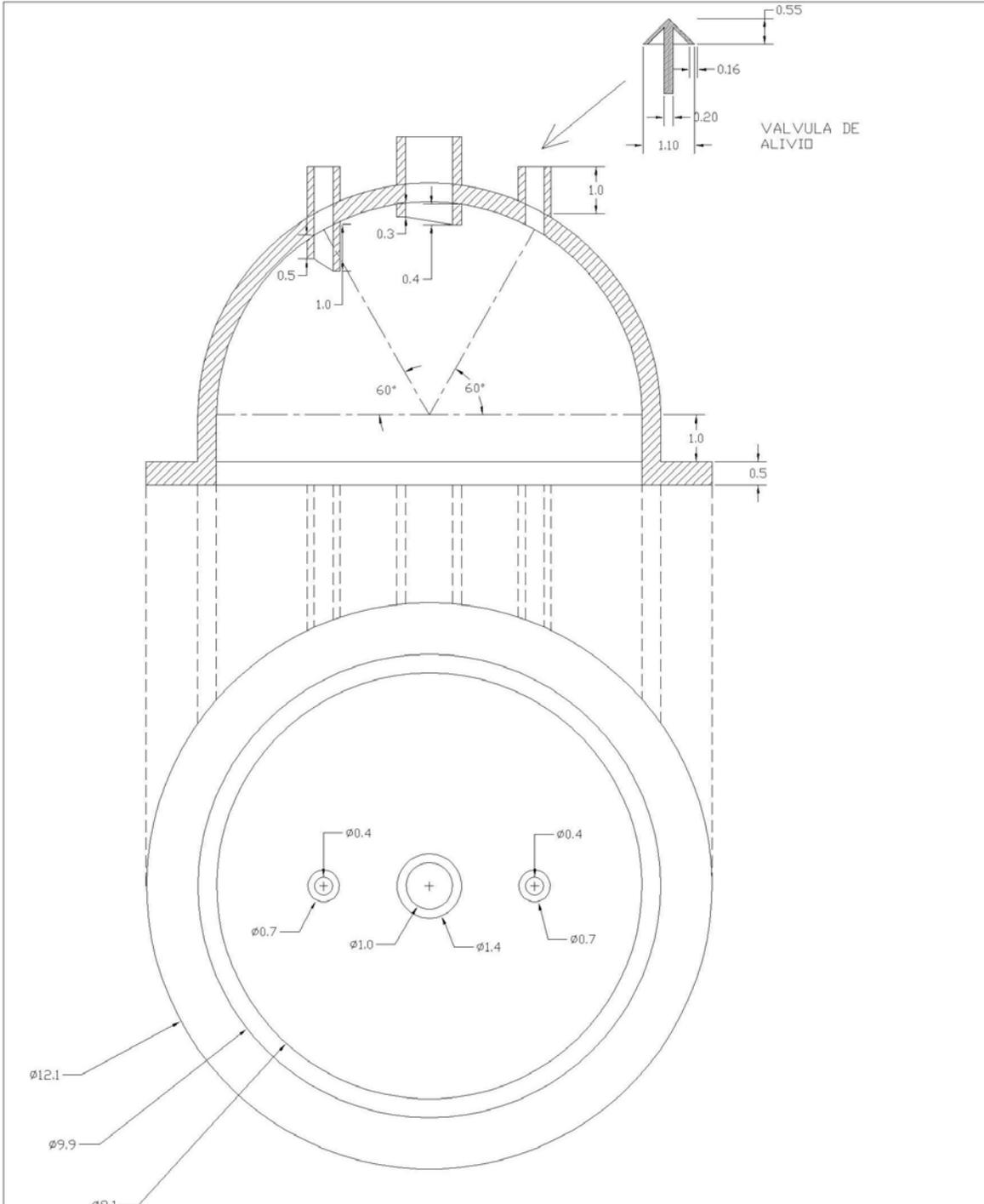
EQUIPO:
FOTOBIOREACTOR

ACOTACIONES:
cm

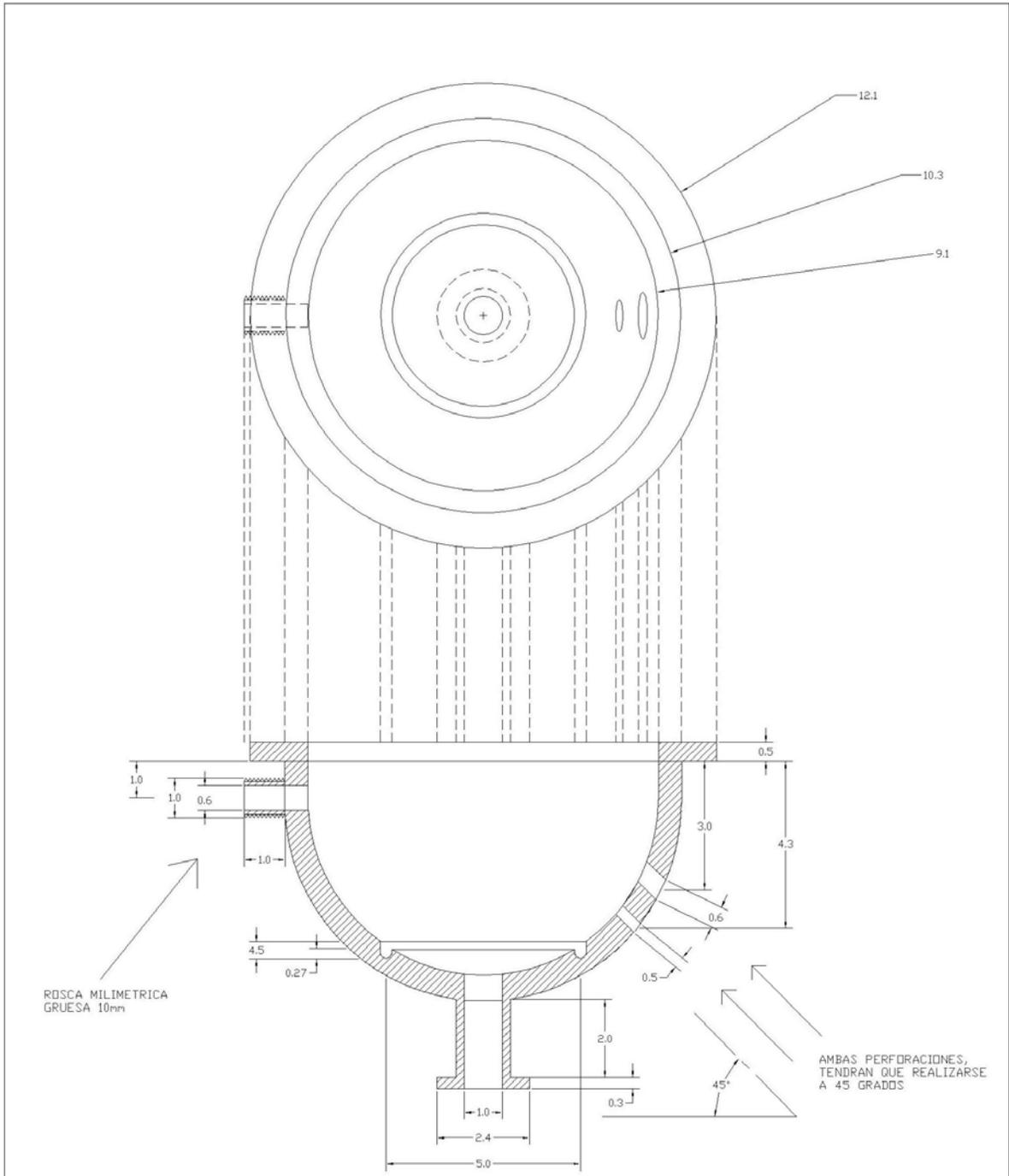
El plano S-04 muestra el soporte para el sistema de lámparas, como puede observarse, es un sistema pensado para el intercambio de distintos tamaños de lámparas.

Diagramas mecánicos

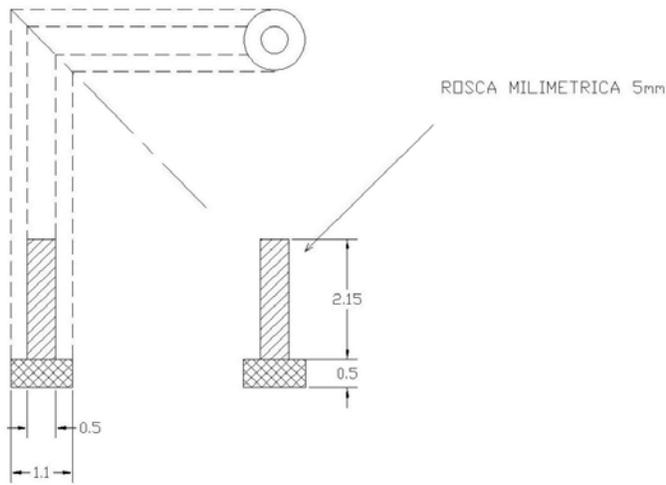
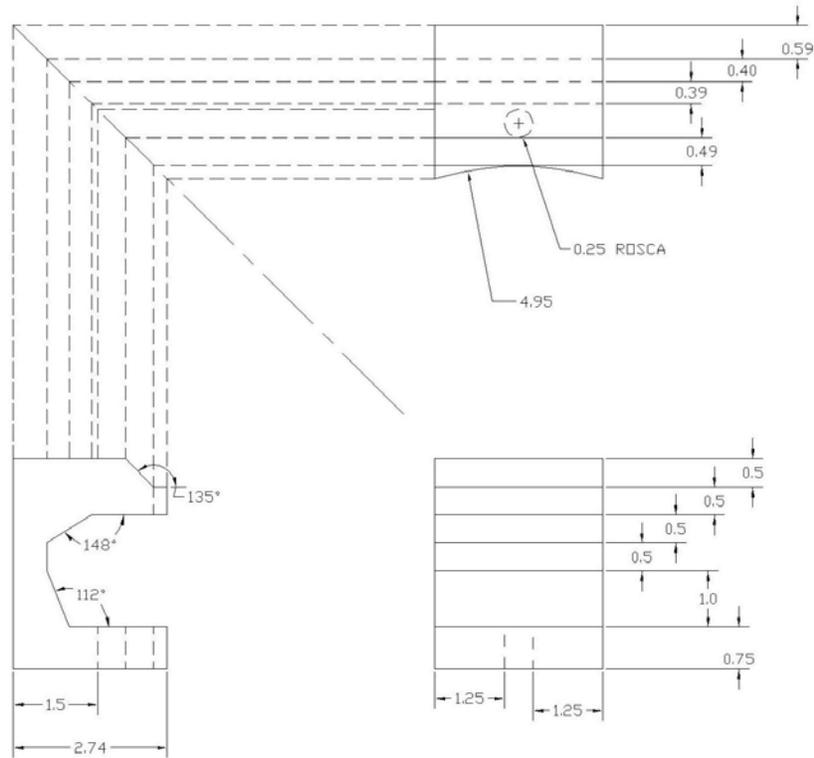
Los detalles mecánicos presentados a continuación, corresponden a la relación geométrica $D_r/D_d = 0.5$. Aunque no resulta ser la mejor configuración en términos de alcance de KLa, tiene un tiempo de circulación aceptable, además de ser de construcción viable dimensionalmente hablando, ya que al referirnos por ejemplo a la relación $D_r/D_d = 0.3$, sus dimensiones resultan pequeñas haciendo con ello que el tubo sea más frágil; por otro lado, si ponemos de ejemplo la relación $D_r/D_d=0.8$ sus dimensiones son muy grandes, dificultando con ello el modo de sujeción y soporte del tubo concéntrico.



UNIDAD PROFESIONAL INERDISCIPLINARIA DE BIOTECNOLOGÍA		
IPN	DIBUJO: GUILLERMO CUARTO NOVERÓN NAVA	PLANO: T-01
	CORTE LATERAL Y VISTA SUPERIOR DE TAPA SUPERIOR	
	EQUIPO: FOTOBIOREACTOR	
ACOTACIONES: cm		



UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE BIOTECNOLOGÍA		
IPN	DIBUJO: GUILLERMO CUARTO NOVERÓN NAVA	PLANO: T-01
	CORTE LATERAL Y VISTA SUPERIOR DE TAPA INFERIOR	
	EQUIPO: BIORREACTOR	ACOTACIONES: cm



UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE BIOTECNOLOGÍA

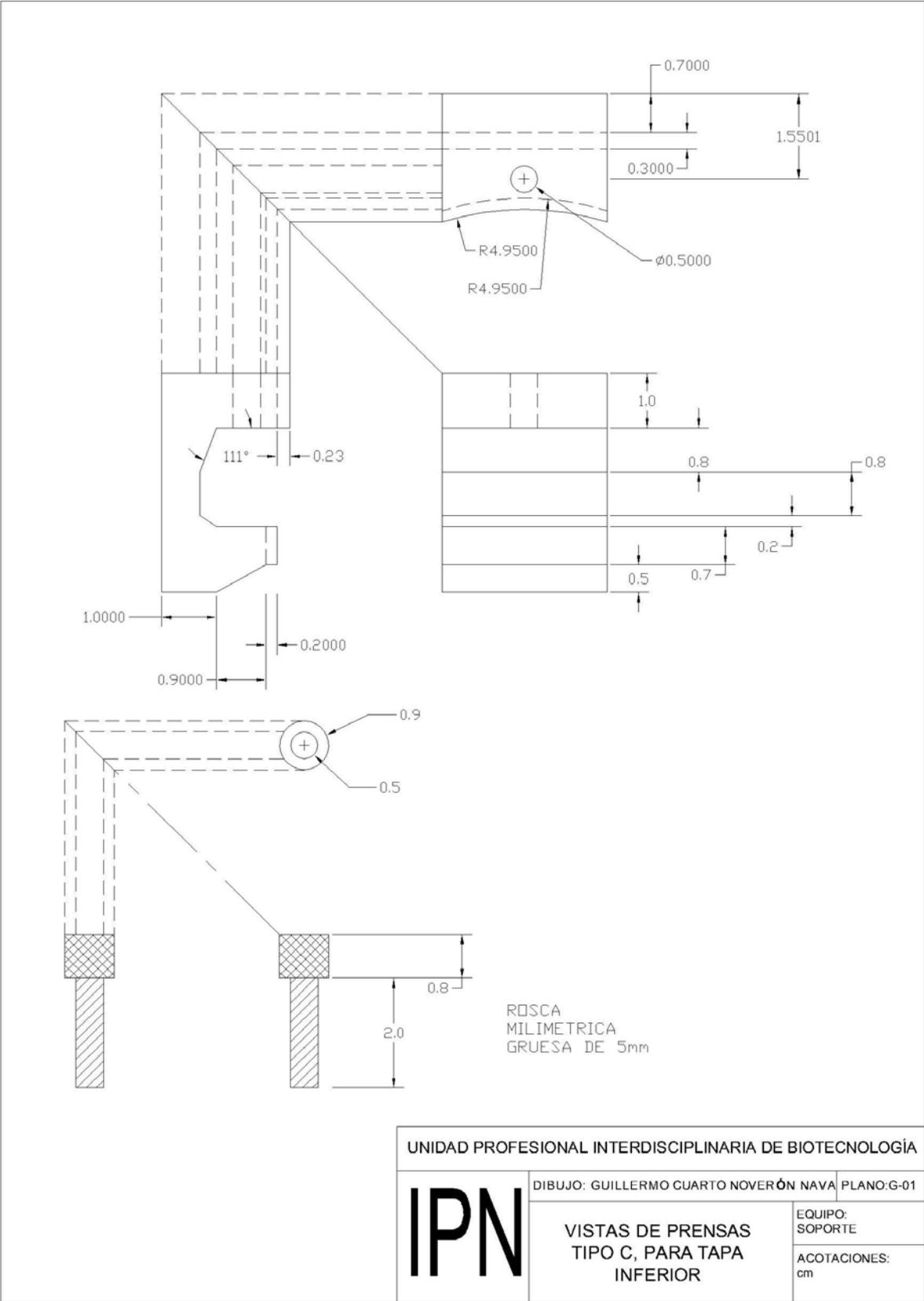
IPN

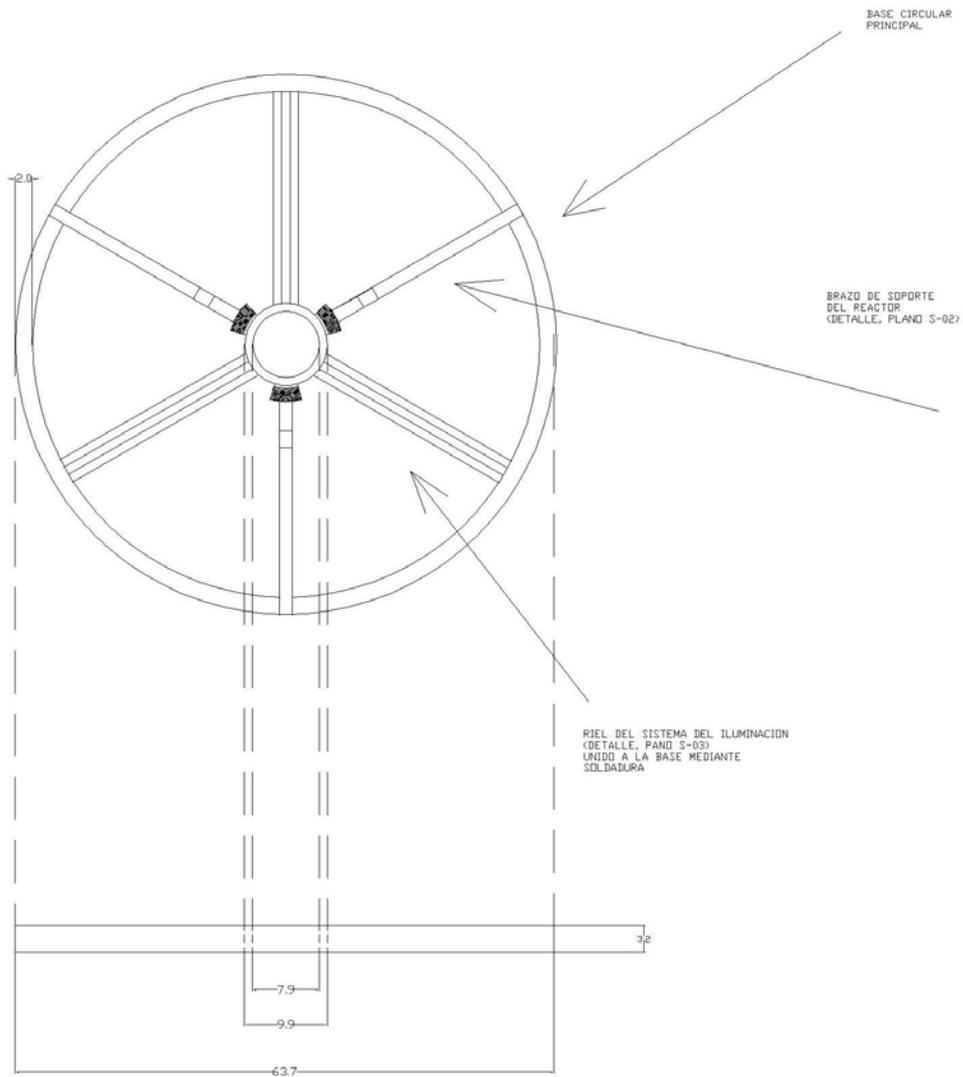
DIBUJO: GUILLERMO CUARTO NOVERÓN NAVA PLANO: V-02

VISTAS DE PRENSAS
TIPO C, PARA TAPA
SUPERIOR

EQUIPO:
BIORREACTOR

ACOTACIONES:
cm





UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE BIOTECNOLOGÍA

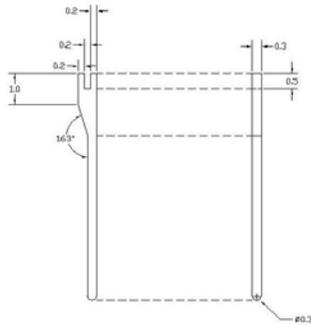
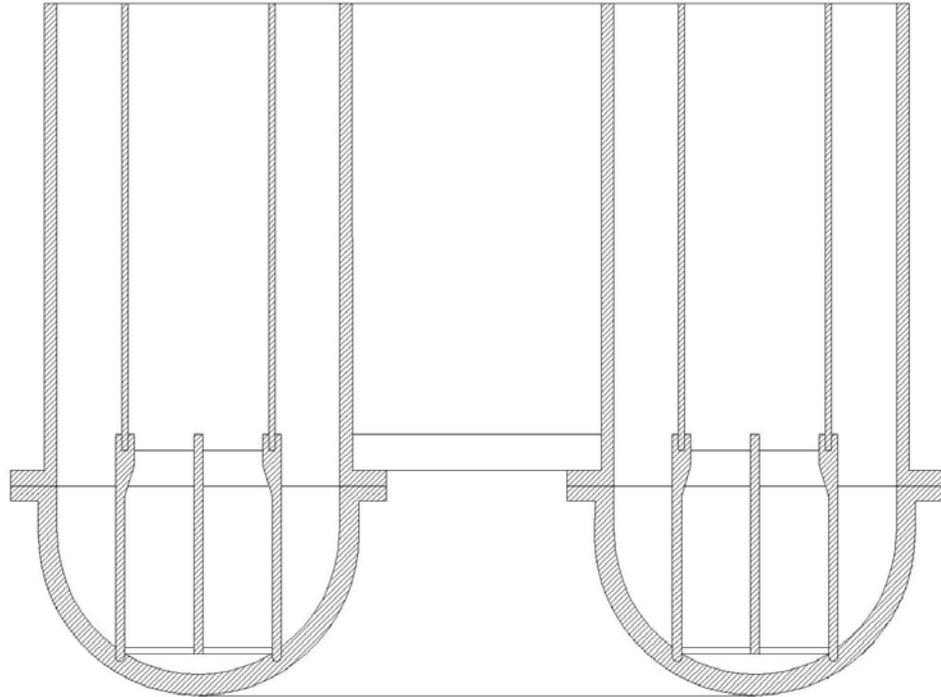
IPN

DIBUJO: GUILLERMO CUARTO NOVER **ÓN NAVA** PLANO: S-01

VISTA SUPERIOR DEL SOPORTE EXTERNO Y VISTA LATERAL DE LA BASE CIRCULAR

EQUIPO: FOTOBIOREACTOR

ACOTACIONES: cm



UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE BIOTECNOLOGÍA

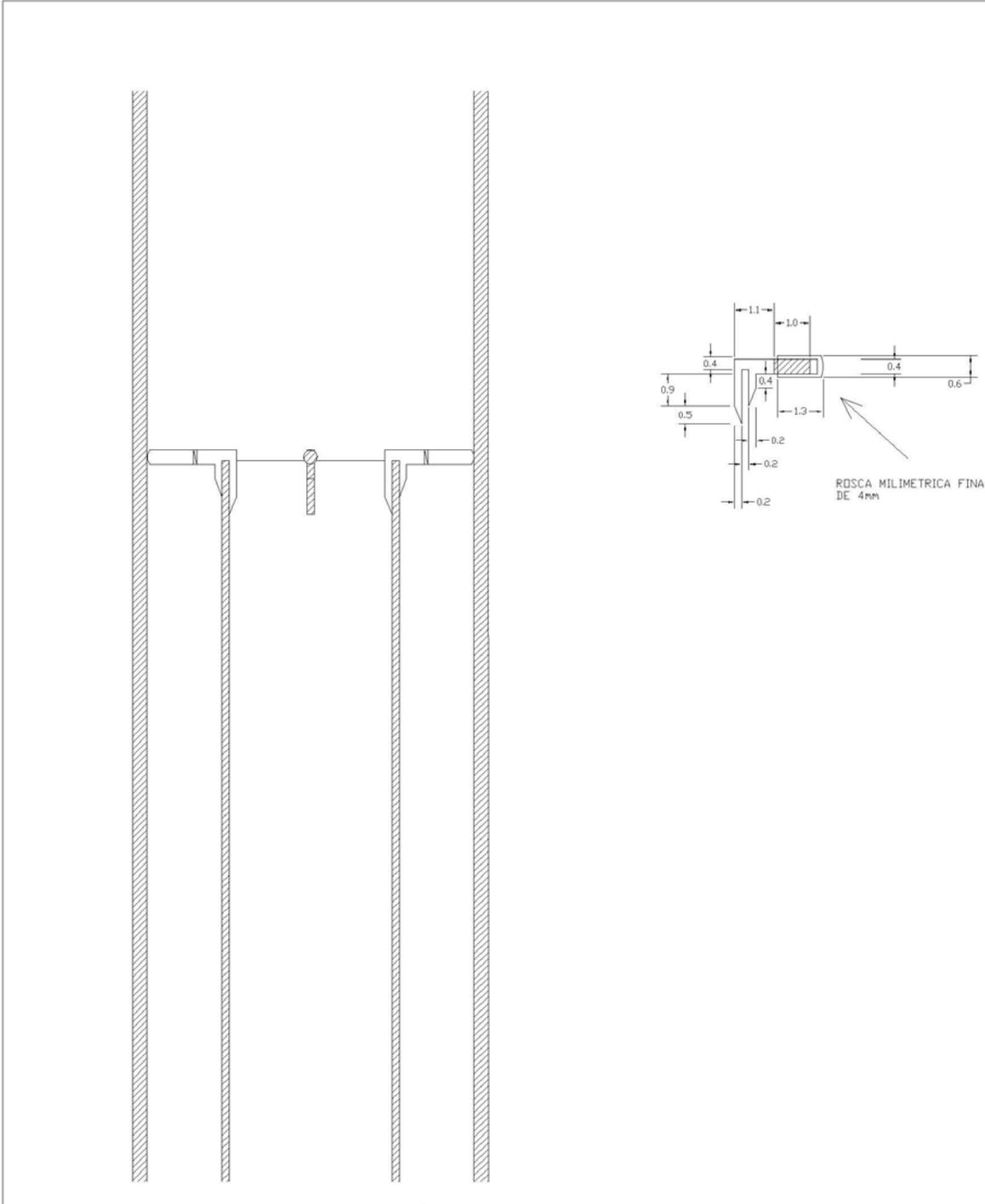
IPN

DIBUJO: GUILLERMO CUARTO NOVERÓN NAVA PLANO: G-01

COLOCACIÓN DEL
DIFUSOR Y TUBO

EQUIPO:
FOTOBIOREACTOR

ACOTACIONES:
cm



UNIDAD PROFESIONAL INERDISCIPLINARIA DE BIOTECNOLOGÍA

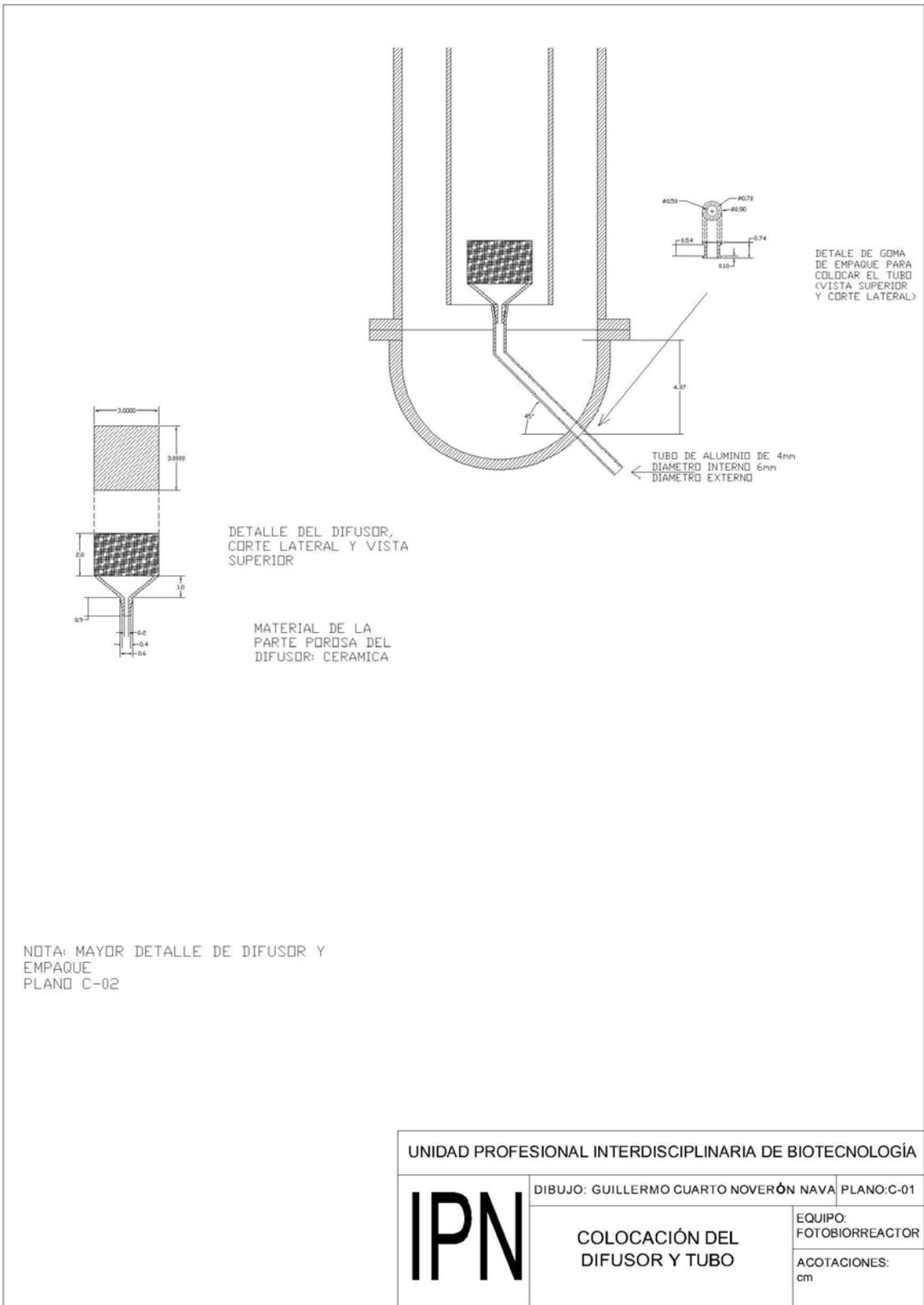
IPN

DIBUJO: GUILLERMO CUARTO NOVERÓN NAVA | PLANO:G-01

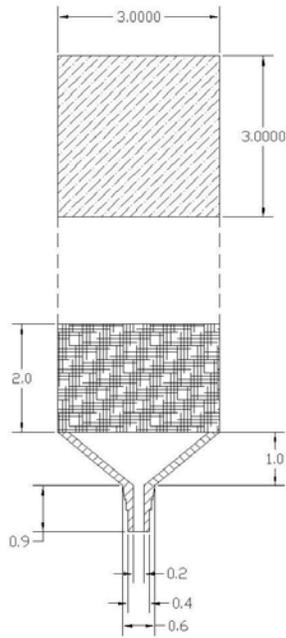
SUJETORES DEL TUBO
DE ARRASTRE

EQUIPO:
FOTOBIOREACTOR

ACOTACIONES:
cm

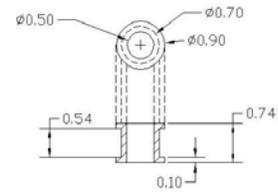


UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE BIOTECNOLOGÍA		
IPN	DIBUJO: GUILLERMO CUARTO NOVERÓN NAVA PLANO: C-01	
	COLOCACIÓN DEL DIFUSOR Y TUBO	
	EQUIPO: FOTOBIOREACTOR	
ACOTACIONES: cm		



DETALLE DEL DIFUSOR,
CORTE LATERAL Y VISTA
SUPERIOR

MATERIAL DE LA
PARTE POROSA DEL
DIFUSOR: CERAMICA



DETALLE DE GOMA
DE EMPAQUE PARA
COLOCAR EL TUBO
(VISTA SUPERIOR
Y CORTE LATERAL)

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE BIOTECNOLOGÍA

DIBUJO: GUILLERMO CUARTO NOVERÓN NAVA PLANO: C-02

IPN

COLOCACIÓN DEL
DIFUSOR Y TUBO

EQUIPO:
FOTOBIOREACTOR

ACOTACIONES:
cm

6. CONCLUSIONES

El uso de estimaciones y simuladores en el proceso de diseño arroja resultados tales que se puede predecir hasta cierto punto el comportamiento del equipo, y esto posteriormente contrastarlo con las variables medidas en caso de que sea construido el reactor.

El diseño permite realizar cambios en el tubo concéntrico (ello bajo ligeras modificaciones en los bastones de soporte), ampliando con esto la gama de utilidad del reactor.

Aunque el diseño no contempla un sistema de esterilización, si esta pensado para una operación aséptica, que cubre con las exigencias generales de cultivo de organismos fotosintéticos

Las características del diseño, permiten experimentar con distintos tipos de lámparas en el mismo sistema, así como también la adecuada medición de distancias entre la fuente de luz y el reactor.

El diseño permite la adaptación de instrumentación requerida para el óptimo control del proceso.

Se estableció un diseño de un fotobiorreactor en el que se podrán cultivar microalgas y otros microorganismos fotosintéticos.

Se estableció un método de diseño flexible, que no solo indica la construcción de un fotobiorreactor en particular, si no que además sirve como base para posteriores diseños.

La secuencia de cálculo establecida, permite predecir el comportamiento del biorreactor bajo distintas condiciones de operación (flujos de aire).

El coeficiente de transferencia de CO_2 no resulta ser una limitante en el cultivo.

7. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

En caso de que se pretenda el desarrollo de un diseño orientado a organismos específicos, es recomendable utilizar valores óptimos para el desarrollo del sistema de aireación.

Es recomendable seguir el procedimiento general aquí establecido en el desarrollo de un fotobiorreactor, ya que el sistema de iluminación depende directamente de las dimensiones establecidas.

El uso de instrumentación, asegura el óptimo funcionamiento del sistema, es recomendable usar instrumentación de uso común, para su fácil adaptación.

8. NOMENCLATURA

a0	Coefficiente adimensional para tanques cilíndricos
a1	Coefficiente adimensional para tanques cilíndricos
Ab	Área libre para flujo entre las secciones aireada y no aireada (base) del reactor
Ad	Área transversal de la región anular
Ar	Área transversal del tubo de arrastre
Cg	Concentración de CO ₂ en la fase gaseosa
Cl	Concentración de CO ₂ en la fase líquida
da	Densidad del aire
Dd	Diámetro del bioreactor
Dr	Diámetro del tubo interno
Dt	Distancia del tubo de arrastre a la base del reactor
g	Aceleración de la gravedad
Gm	Gasto másico
Gv	Gasto volumétrico
H _D	Altura de dispersión (altura del líquido aireado)
Hg	Constante de Henry
Hi	Altura del tubo interno
HL	Altura del líquido
Ht	Altura de la parte cilíndrica del bioreactor
kB	Constante de fricción
KLa	coeficiente de transferencia de CO ₂ del reactor
KLa-an	Coefficiente estimado de transferencia de CO ₂ del reactor diseñado cuando la aireación es la región anular

KL _{aL-an}	Coefficiente estimado de transferencia de CO ₂ la región anular de reactor aireado
KL _{aL-tu}	Coefficiente estimado de transferencia de CO ₂ en el tubo concéntrico de reactor aireado
KL _{a-tu}	Coefficiente estimado de transferencia de CO ₂ del reactor diseñado cuando la aireación es el tubo concéntrico interno
Ma	Masa molecular del aire
Pa	Presión atmosférica
P _{cc}	Presión parcial de CO ₂
P _d	Presión de diseño
P _{g/V_L}	Potencia suministrada por unidad de volumen
Ph	Presión manométrica del reactor
Q _{co}	Velocidad de consumo de CO ₂
R _g	Constante universal de los gases
S ₁	Máximo estrés permitido para el material
t	Espesor del tanque
T _a	Temperatura de entrada del aire
t _c	Tiempo de circulación
t _t	Espesor de las tapas
U _{Gr}	Velocidad superficial del gas en la región de introducción de aire
U _{Lr}	Velocidad superficial del líquido en la región aireada del reactor
V _c	Volumen de la parte cilíndrica
V _{op}	Volumen de operación
V _T	Volumen total del biorreactor
V _t	Volumen de las tapas
V _T CO ₂	Velocidad de transferencia de CO ₂
X	Concentración celular
Y _{co}	Rendimiento de biomasa en base al CO ₂
ε	Fracción total de gas retenido (referido en gráficos como e)
ε _d	Fracción de gas retenido en la sección no aireada del reactor
ε _r	Fracción de gas retenido en la sección de introducción de aire del reactor
μ	Velocidad específica de crecimiento
ρ _L	Densidad del líquido
%V	Porcentaje del volumen útil del biorreactor

9. BIBLIOGRAFÍA

- A Vonshak, A. Richmond, Mass production of the blue-green algae *Spirulina*: an overview , Biomass 15 (1998)
- Aranda, J. (1995).Diseño de un biorreactor airlift multipropósito a escala piloto (Tesis profesional), Unidad profesional Interdisciplinaria de Biotecnología del Instituto Politécnico Nacional, México D.F.
- Attilio Converti , Alessandra Lodi, Adriana Del Borghi, Carlo Solisio. Cultivation of *Spirulina platensis* in a combined airlift-tubular reactor system Biochemical Engineering Journal 32 (2006) 13–18.
- Becker, E.W. 1995. Microalgae. Biotechnology and microbiology. Cambridge, University Press.

- D. Soletto, L. Binaghi, L. Ferrari, A. Lodi, J.C.M. Carvalho, M. Zilli, A. Converti. Effects of carbon dioxide feeding rate and light intensity on the fed-batch pulse-feeding cultivation of *Spirulina*. *Biochemical Engineering Journal* 39 (2008) pp. 369–375
- *platensis* in helical photobioreactor
- FLORES, Coral Contreras, Pena-Castro, Julián Mario, Flores-Cotera, Luis Bernardo *et al.* Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas. *INCI*, ago. 2003, vol.28, no.8, pp.450-456. ISSN 0378-1844.
- G. Torzillo, A. Sacchi, R. Materassi, Temperature as an important factor affecting productivity and night biomass loss in *Spirulina platensis* grown outdoors in tubular photo bioreactor, *Biores. Technol.* 38 (1991).
- G. Torzillo, Tubular Bioreactors, in: A. Vonshak (Ed.), *Spirulina platensis* (Arthrospira): Physiology, Cell-Biology and Biotechnology, Taylor & Francis, London, 1997.
- Jorge Alberto Vieira Costa, Giani Andrea Linde, Daniel Ibraim Pires Atala, Guilherme Martinez Mibielli and Roselini Trapp KruËger. Modelling of growth conditions for cyanobacterium *Spirulina platensis* in microcosms, *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 2000, pp. 15-18.
- Kaplan, A. (1981) Photoinhibition in *Spirulina platensis*: response of photosynthesis and HCO₃⁻ uptake capability to CO₂- depleted conditions. *J. Exper. Bot.*, **32**, 669.
- L. Tomaselli, G. Boldrini & M.C. Margheri. Physiological behaviour of *Arthrospira* (*Spirulina*) *maxima* during acclimation to changes in irradiance. *Journal of Applied Phycology* 1997, pp. 37–43,
- Luciane Maria Colla, Christian Oliveira Reinehr, Carolina Reichert, Jorge Alberto Vieira Costa. Production of biomass and nutraceutical compounds by *Spirulina platensis* under different temperature and nitrogen regimes. *Bioresource Technology* 98 (2007), pp. 1489–1493.
- Margulis, L. y Sagan, D. 2002. *Acquiring genomes. A theory of the origins of species*.
- Mendiola, J.A., Jaime, L., Santoyo, S., Reglero, G., Cifuentes, A., Ibañez, E., Señoráns, F.J. (Unidad Asociada CSIC-UAM Ciencias de los Alimentos)
- Michele Greque de Morais, Jorge Alberto Vieira Costa. Biofixation of carbon dioxide by *Spirulina* sp. and *Scenedesmus obliquus* cultivated in a three-stage serial tubular photobioreactor. *Journal of Biotechnology* 129 (2007). pp. 439–445
- Michele Greque de Morais, Jorge Alberto Vieira Costa. Carbon dioxide fixation by *Chlorella kessleri*, *C. vulgaris*, *Scenedesmus obliquus* and *Spirulina* sp. cultivated in flasks and vertical tubular photobioreactors. Springer Science+Business Media B.V. 2007. pp. 1349–1352.
- Ramirez-Moreno, Liliana y Olvera-Ramirez, Roxana. Uso tradicional y actual de *spirulina* sp. (*arthrospira* sp.). *INCI*, sep. 2006, vol.31, no.9, p.657-663. ISSN 0378-1844.
- Sandler, H.J. & E.T. Luckiewicz. (1987). *Practical Process Engineering*, Mc Graw Hill, New York, USA.
- Schügerl, K. (1991). *Biorreactors*; en Prave, P. (1991). *Fundamentals of Biotechnology*, VCH Publishers, New York, USA.
- <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.06.068> *Food Chemistry* (2007) 102 (4), pp. 1357-1367

10. ANEXOS

10.1 Resultados del simulador

Resultados obtenidos usando la relación geométrica $D_r/D_d=0.5$ al 80 %V.

DATO	VALOR	DATO	VALOR
Ab	0.01	Dliq	2.42e-9
Ad	1.034e-3	F	0.6808
Ar	1.615e-3	G	9.81
Dd	0.091	mu	0.001
Dr	0.045	omega	1.572e-3
D	1.0e-4	Rho	1000
HL	0.789	sigma	0.073

UGr (m/s)	ULr (m/s)	Pg/VL (W/m ³)	tc (s)	e	KLa-an (1/s)	KLa-tu (1/s)
0.1	0.21	598	26.1	0.13	0.0328	0.0329
0.2	0.24	897	19.1	0.17	0.0466	0.0479
0.2	0.26	1196	15.2	0.21	0.0589	0.0618
0.3	0.27	1495	12.8	0.24	0.0699	0.0744
0.3	0.28	1794	11.1	0.27	0.0799	0.086
0.4	0.29	2093	9.87	0.29	0.0902	0.0981
0.4	0.3	2392	8.89	0.32	0.0981	0.108
0.5	0.3	2691	8.12	0.34	0.105	0.116
0.5	0.31	2990	7.48	0.36	0.112	0.124
0.6	0.31	3289	6.94	0.38	0.118	0.132
0.6	0.32	3588	6.49	0.4	0.123	0.138
0.7	0.32	3888	6.1	0.42	0.128	0.144
0.7	0.33	4187	5.76	0.44	0.132	0.15
0.8	0.33	4486	5.46	0.45	0.136	0.155
0.8	0.33	4785	5.19	0.47	0.139	0.159
0.9	0.34	5084	4.95	0.49	0.142	0.163
0.9	0.34	5383	4.74	0.5	0.145	0.166
1	0.34	5682	4.54	0.52	0.147	0.169

Resultados obtenidos usando la relación geométrica $D_r/D_d=0.5$ al 70 %V.

DATO	VALOR	DATO	VALOR
Ab	0.011	Dliq	2.42e-9
Ad	1.13e-3	F	0.6808
Ar	1.765e-3	G	9.81
Dd	0.095	mu	0.001
Dr	0.045	omega	1.572e-3
D	1.0e-4	Rho	1000
HL	0.724	sigma	0.073

UGr (m/s)	ULr (m/s)	Pg/VL (W/m ³)	tc (s)	e	KLa-an (1/s)	KLa-tu (1/s)
0.1	0.21	598.1	23.8	0.13	0.0334	0.0341
0.15	0.23	897.1	17.4	0.171	0.0474	0.0498
0.2	0.25	1196	13.9	0.206	0.0599	0.0641
0.25	0.26	1495	11.7	0.238	0.0712	0.0772
0.3	0.27	1794	10.2	0.267	0.0813	0.0893
0.35	0.28	2093	9.01	0.295	0.0917	0.102
0.4	0.29	2392	8.12	0.319	0.0997	0.111
0.45	0.29	2691	7.41	0.341	0.107	0.12
0.5	0.3	2990	6.83	0.363	0.114	0.129
0.55	0.3	3289	6.34	0.383	0.12	0.136
0.6	0.31	3589	5.93	0.403	0.125	0.143
0.65	0.31	3888	5.57	0.421	0.13	0.149
0.7	0.31	4187	5.26	0.439	0.134	0.155
0.75	0.32	4486	4.98	0.456	0.138	0.16
0.8	0.32	4785	4.74	0.472	0.141	0.164
0.85	0.32	5084	4.52	0.488	0.144	0.168
0.9	0.33	5383	4.33	0.503	0.147	0.172
0.95	0.33	5682	4.15	0.518	0.149	0.175

Resultados obtenidos usando la relación geométrica $D_r/D_d=0.3$ al 80 %V.

DATO	VALOR	DATO	VALOR
Ab	6.154e-3	Dliq	2.42e-9
Ad	3.721e-4	F	0.6808
Ar	5.814e-4	G	9.81
Dd	0.091	mu	0.001
Dr	0.027	omega	1.572e-3
D	1.0e-4	Rho	1000
HL	0.789	sigma	0.073

UGr (m/s)	ULr (m/s)	Pg/VL (W/m ³)	tc (s)	e	KLa-an (1/s)	KLa-tu (1/s)
0.1	0.26	598.2	26.1	0.123	0.0298	0.0392
0.15	0.29	897	19.1	0.163	0.0422	0.057
0.2	0.31	1196	15.2	0.197	0.0534	0.0736
0.25	0.33	1495	12.8	0.228	0.0636	0.0888
0.3	0.34	1795	11.1	0.255	0.0727	0.103
0.35	0.35	2094	9.87	0.281	0.0811	0.116
0.4	0.36	2393	8.89	0.305	0.0887	0.128
0.45	0.37	2692	8.12	0.329	0.0967	0.14
0.5	0.38	2991	7.48	0.35	0.103	0.15
0.55	0.39	3290	6.94	0.37	0.108	0.159
0.6	0.39	3589	6.49	0.39	0.113	0.167
0.65	0.4	3888	6.1	0.408	0.118	0.175
0.7	0.4	4187	5.76	0.425	0.122	0.182
0.75	0.41	4486	5.46	0.442	0.126	0.188
0.8	0.41	4785	5.19	0.459	0.129	0.193
0.85	0.42	5084	4.95	0.474	0.132	0.198
0.9	0.42	5384	4.74	0.49	0.134	0.203
0.95	0.43	5683	4.54	0.505	0.136	0.206

Resultados obtenidos usando la relación geométrica $Dr/Dd=0.4$ al 80 %V.

DATO	VALOR	DATO	VALOR
Ab	8.206e-3	Dliq	2.42e-9
Ad	6.616e-4	F	0.6808
Ar	1.034e-3	G	9.81
Dd	0.091	mu	0.001
Dr	0.036	omega	1.572e-3
D	1.0e-4	Rho	1000
HL	0.789	sigma	0.073

UGr (m/s)	ULr (m/s)	Pg/VL (W/m ³)	tc (s)	e	KLa-an (1/s)	KLa-tu (1/s)
0.1	0.23	598.2	26.1	0.126	0.0314	0.0355
0.15	0.26	897.3	19.1	0.166	0.0445	0.0516
0.2	0.28	1196	15.2	0.201	0.0563	0.0666
0.25	0.3	1496	12.8	0.232	0.067	0.0803
0.3	0.31	1795	11.1	0.261	0.0766	0.0929
0.35	0.32	2094	9.87	0.287	0.0853	0.104
0.4	0.33	2393	8.89	0.312	0.0944	0.117
0.45	0.33	2692	8.12	0.335	0.101	0.126
0.5	0.34	2991	7.48	0.356	0.108	0.135
0.55	0.35	3290	6.94	0.376	0.113	0.143
0.6	0.35	3589	6.49	0.396	0.119	0.15
0.65	0.36	3888	6.1	0.414	0.123	0.157
0.7	0.36	4188	5.76	0.432	0.128	0.163
0.75	0.36	4487	5.46	0.449	0.131	0.168
0.8	0.37	4786	5.19	0.465	0.135	0.173
0.85	0.37	5085	4.95	0.481	0.137	0.177
0.9	0.38	5384	4.74	0.496	0.14	0.181
0.95	0.38	5683	4.54	0.511	0.142	0.184

Resultados obtenidos usando la relación geométrica $Dr/Dd=0.6$ al 80 %V.

DATO	VALOR	DATO	VALOR
Ab	0.012	Dliq	2.42e-9
Ad	1.488e-3	F	0.6808
Ar	2.326e-3	G	9.81
Dd	0.091	mu	0.001
Dr	0.054	omega	1.572e-3
D	1.0e-4	Rho	1000
HL	0.789	sigma	0.073

UGr (m/s)	ULr (m/s)	Pg/VL (W/m ³)	tc (s)	e	KLa-an (1/s)	KLa-tu (1/s)
0.1	0.2	598.3	26.1	0.13	0.0339	0.0308
0.15	0.22	897.4	19.1	0.172	0.0481	0.0449
0.2	0.24	1197	15.2	0.207	0.0608	0.0579
0.25	0.25	1496	12.8	0.239	0.0721	0.0697
0.3	0.26	1795	11.1	0.268	0.0824	0.0805
0.35	0.27	2094	9.87	0.296	0.0929	0.0916
0.4	0.28	2393	8.9	0.32	0.101	0.1
0.45	0.28	2692	8.12	0.343	0.108	0.109
0.5	0.29	2991	7.48	0.365	0.115	0.116
0.55	0.29	3290	6.95	0.385	0.121	0.123
0.6	0.3	3590	6.49	0.404	0.127	0.129
0.65	0.3	3889	6.1	0.423	0.131	0.134
0.7	0.3	4188	5.76	0.44	0.136	0.139
0.75	0.31	4487	5.46	0.457	0.14	0.144
0.8	0.31	4786	5.19	0.474	0.143	0.148
0.85	0.31	5085	4.95	0.489	0.146	0.151
0.9	0.32	5384	4.74	0.505	0.148	0.154
0.95	0.32	5684	4.54	0.519	0.15	0.157

Resultados obtenidos usando la relación geométrica $D_r/D_d=0.7$ al 80 %V.

DATO	VALOR	DATO	VALOR
Ab	0.014	Dliq	2.42e-9
Ad	2.026e-3	F	0.6808
Ar	3.166e-3	G	9.81
Dd	0.091	mu	0.001
Dr	0.063	omega	1.572e-3
D	1.0e-4	Rho	1000
HL	0.789	sigma	0.073

UGr (m/s)	ULr (m/s)	Pg/VL (W/m ³)	tc (s)	e	KLa-an (1/s)	KLa-tu (1/s)
0.1	0.19	598.2	26.1	0.132	0.0348	0.0291
0.15	0.21	897.3	19.1	0.174	0.0494	0.0425
0.2	0.23	1196	15.2	0.21	0.0624	0.0547
0.25	0.24	1495	12.8	0.242	0.074	0.0658
0.3	0.25	1795	11.1	0.272	0.0859	0.0773
0.35	0.26	2094	9.87	0.299	0.095	0.0863
0.4	0.26	2393	8.89	0.323	0.103	0.0946
0.45	0.27	2692	8.12	0.346	0.111	0.102
0.5	0.27	2991	7.48	0.367	0.118	0.109
0.55	0.28	3290	6.94	0.388	0.124	0.115
0.6	0.28	3589	6.49	0.407	0.129	0.121
0.65	0.28	3888	6.1	0.426	0.134	0.126
0.7	0.29	4187	5.76	0.443	0.139	0.131
0.75	0.29	4486	5.46	0.46	0.142	0.135
0.8	0.29	4786	5.19	0.477	0.146	0.139
0.85	0.3	5085	4.95	0.492	0.149	0.142
0.9	0.3	5384	4.74	0.507	0.151	0.145
0.95	0.3	5683	4.54	0.522	0.153	0.147

Resultados obtenidos usando la relación geométrica $D_r/D_d=0.8$ al 80 %V.

DATO	VALOR	DATO	VALOR
Ab	0.016	Dliq	2.42e-9
Ad	2.646e-3	F	0.6808
Ar	4.135e-3	G	9.81
Dd	0.091	mu	0.001
Dr	0.073	omega	1.572e-3
D	1.0e-4	Rho	1000
HL	0.789	sigma	0.073

UGr (m/s)	ULr (m/s)	Pg/VL (W/m ³)	tc (s)	e	KLa-an (1/s)	KLa-tu (1/s)
0.1	0.19	598.2	26.1	0.132	0.0348	0.0291
0.15	0.21	897.3	19.1	0.174	0.0494	0.0425
0.2	0.23	1196	15.2	0.21	0.0624	0.0547
0.25	0.24	1495	12.8	0.242	0.074	0.0658
0.3	0.25	1795	11.1	0.272	0.0859	0.0773
0.35	0.26	2094	9.87	0.299	0.095	0.0863
0.4	0.26	2393	8.89	0.323	0.103	0.0946
0.45	0.27	2692	8.12	0.346	0.111	0.102
0.5	0.27	2991	7.48	0.367	0.118	0.109
0.55	0.28	3290	6.94	0.388	0.124	0.115
0.6	0.28	3589	6.49	0.407	0.129	0.121
0.65	0.28	3888	6.1	0.426	0.134	0.126
0.7	0.29	4187	5.76	0.443	0.139	0.131
0.75	0.29	4486	5.46	0.46	0.142	0.135
0.8	0.29	4786	5.19	0.477	0.146	0.139
0.85	0.3	5085	4.95	0.492	0.149	0.142
0.9	0.3	5384	4.74	0.507	0.151	0.145
0.95	0.3	5683	4.54	0.522	0.153	0.147

