

DESARROLLO DE LA INGENIERÍA DE DETALLE DE UN FOTOBIORREACTOR  
DE PANEL PLANO PARA LA GENERACIÓN DE BIOMASA MICROALGAL CON  
UN VOLUMEN DE TREINTA LITROS

JOSEPH SEBASTIÁN VELANDIA BARÓN  
DANIEL ALEJANDRO TORRES BUSTOS

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BOGOTÁ D.C  
2019

DESARROLLO DE LA INGENIERÍA DE DETALLE DE UN FOTOBIORREACTOR  
DE PANEL PLANO PARA LA GENERACIÓN DE BIOMASA MICROALGAL CON  
UN VOLUMEN DE TREINTA LITROS

JOSEPH SEBASTIÁN VELANDIA BARÓN  
DANIEL ALEJANDRO TORRES BUSTOS

Proyecto integral de grado para optar por el título de  
INGENIERO MECÁNICO

Director  
Diego Rubio Fernández  
Biólogo

Codirector  
Miguel Alfonso Morales Granados  
Ingeniero Mecánico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BOGOTÁ D.C.  
2019

NOTA DE ACEPTACIÓN:

---

---

---

---

---

---

Diego Rubio Fernández  
Presidente del jurado

---

Miguel Alfonso Morales Granados  
Jurado 1

---

Juan Andrés Sandoval Herrera  
Jurado 2

Bogotá, febrero de 2019

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro.

**Dr. JAIME POSADA DÍAZ**

Vicerrectoría de Desarrollo y Recursos Humanos

**Dr. LUIS JAIME POSADA GARCIA**

Vicerrectoría Académica y de Posgrados

**Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS**

Decano Facultad de Ingenierías

**Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI**

Director General de Investigación y Proyección social

**Dr. MANUEL CANCELADO JIMÉNEZ**

Director Programa Ingeniería Mecánica

**Ing. CARLOS MAURICIO VELOZA VILLAMIL**

Las directivas de la universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas, expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

## DEDICATORIA

*Dedico este trabajo de grado a Dios por estar siempre presente en cada etapa de mi vida, iluminándome y brindándome siempre su protección.*

*A mis padres, por ser siempre mi apoyo incondicional, ser mi motivación y mi guía para llegar hasta estos momentos de mi vida, doy mil gracias a ellos por enseñarme a ser responsable y perseverante para lograr cada meta y sueño.*

*A mis hermanos, por ser mi fuente de motivación e inspiración y así luchar incansablemente por mis sueños.*

*A mi familia, por siempre estar a mi lado y apoyarme en todos los momentos difíciles.*

*A los profesores por brindar todo su conocimiento y experiencia para convertirme en un gran profesional.*

*Joseph Sebastián Velandia Barón*

## DEDICATORIA

*Quiero dedicar este trabajo a mis papas, quienes siempre me han apoyado en todo lo que he necesitado, y me han dado ánimos en los momentos complicados. Además de brindarme siempre sus valiosos consejos.*

*A mi novia, Katherine, por estar a mi lado siempre, por darme fuerzas en los momentos en que las he necesitado y siempre brindarme una sonrisa.*

*A mi hermana, que siempre me ha ayudado siempre que he necesitado de su ayuda.*

*A mi tío Oscar, quien siempre me ha brindado su apoyo incondicional en lo que he necesitado a lo largo de la carrera.*

*A mi familia, por siempre brindarme su apoyo incondicionalmente.*

*Daniel Alejandro Torres Bustos*

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todas las personas que nos colaboraron con la realización de este trabajo, quienes en todo momento nos guiaron e hicieron posible cumplir cada uno de los objetivos propuestos.

En primer lugar, agradecemos a nuestros padres por guiarnos durante toda nuestra carrera, quienes con sus consejos fueron nuestra motivación, muchas gracias por brindarnos su comprensión, paciencia y experiencia.

Al Biólogo, Diego Rubio, quien, como director, fue nuestra guía y un constante apoyo durante la realización del proyecto.

Al ingeniero, Miguel Morales, quien en calidad de co-director de este proyecto, nos brindó todo su conocimiento y asesoría.

Al ingeniero Juan Felipe Giraldo, cuyo apoyo y colaboración fue muy importante para el desarrollo de este proyecto.

A los docentes de la Universidad de América, por sus asesorías y conocimiento brindado.

Y a todas y cada una de las personas que nos colaboraron con la realización de este trabajo de grado.

## CONTENIDO

	pág
RESUMEN	15
INTRODUCCIÓN	16
OBJETIVOS	17
1. MARCO TEORICO	18
1.1 FOTOBIOREACTOR	18
1.1.1 Definición.	18
1.1.2 Parámetros de diseño	18
1.1.2.1 Temperatura	18
1.1.2.2 Luz	19
1.1.2.3 Mezclado	20
1.1.2.4 pH	21
1.1.2.5 Costos	21
1.1.3 Fotobioreactor panel plano	21
1.2 SIMULACIONES CFD	22
1.2.1 Definición	22
1.3 SIMULACIONES ESTRUCTURALES	22
1.3.1 Definición.	22
1.4 ECUACIONES DE NAVIER-STOKES	23
1.4.1 Definición	23
1.5 METODOLOGIA DE SCORING	23
1.5.1 Definición	23
1.5.2 Etapas	23
2. DISEÑO DETALLADO DEL TANQUE	25
2.1 FORMULACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA LA GEOMETRÍA	25
2.1.1 Fotobioreactor Panel Plano.	25
2.1.2 Fotobioreactor tipo Airlift.	25
2.1.3 Fotobioreactor Panel Plano Volumen dividido.	27
2.2 CONDICIONES DE FLUJO.	27
2.3 SIMULACIÓN DE CFD PARA LAS GEOMETRÍAS PROPUESTAS.	27
2.3.1 Consideraciones.	28
2.3.2 Procedimiento de simulación.	28
2.3.3 Modelos usados.	29
2.3.4 Malla.	29
2.3.5 Convergencia de malla.	30
2.3.6 Perfiles de Velocidad.	32
2.3.7 Régimen de flujo.	34
2.4 SIMULACIÓN ESTRUCTURAL DEL TANQUE	35
2.4.1 Consideraciones	36
2.4.2 Enmallado	36
2.4.3 Condiciones de borde	37

2.4.4 Convergencia de malla	37
3. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE	39
4. DISEÑO DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN	42
4.1 ALTERNATIVAS	42
4.2 SELECCIÓN DE COMPONENTES	43
4.3 UBICACIÓN	44
5. DISEÑO DEL SISTEMA DE AGITACIÓN	45
5.1 SELECCIÓN DEL METODO DE AGITACION	45
5.2 CALCULO DEL COMPRESOR	45
5.3 SELECCION DE COMPRESOR	46
5.4 ELEMENTOS DE CONEXION	48
6. SELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN	50
7. CONCLUSIONES	53
8. RECOMENDACIONES	54
BIBLIOGRAFIA	55
ANEXOS	59

## LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1. Presiones de inyección.	29
Tabla 2. Tamaños de malla	30
Tabla 3. Tamaño de malla (simulación estructural).	37
Tabla 4. Parámetros de selección del compresor	46

## LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1. Intercambiador de calor para un FBR.	18
Figura 2. Zonas de iluminación al interior de un FBR.	20
Figura 3. Variaciones geométricas del FBR Panel Plano.	22
Figura 4. Dominio de fluido para la geometría Panel Plano.	25
Figura 5. Disposiciones para una geometría tipo Airlift.	26
Figura 6. Dominio del fluido para la geometría tipo Airlift.	26
Figura 7. Dominio de fluido individual para el reactor panel plano dividido.	27
Figura 8. Grafica de error para el Panel Plano.	31
Figura 9. Grafica de error para el Airlift.	31
Figura 10. Grafica de error para el Panel plano volumen dividido.	32
Figura 11. Perfil de velocidades del reactor Panel Plano.	32
Figura 12. Perfil de velocidades para el reactor tipo Airlift.	33
Figura 13. Perfil de velocidades del Panel Plano pequeño.	34
Figura 14. Comportamiento Numero de Reynolds.	35
Figura 15. Grafica Esfuerzo-Deformación del Acrílico.	36
Figura 16. Grafica de error simulación estructural.	38
Figura 17. Comportamiento Esfuerzo-Tamaño de malla.	38
Figura 18. Ubicación de la máxima deformación (igual en ambas caras).	38
Figura 19. Primera alternativa de diseño estructura.	39
Figura 20. Segunda alternativa de diseño estructura.	40
Figura 21. Refuerzo estructural tanque de acrílico.	40
Figura 22. Base Fotobioreactor.	41
Figura 23. Ubicación de la soldadura.	41
Figura 24. Alternativas sistemas de iluminación.	42
Figura 25. Componentes iluminación. (MERCADOLIBRE, )	43
Figura 26. Distribución y conexión sistema iluminación.	44
Figura 27. Panel de iluminación.	44
Figura 28. Agitación mediante inyección de aire.	45
Figura 29. Alternativas para el compresor.	47
Figura 30. Racor pasamuro y racor rapido estandar.	48
Figura 31. Geometría del empaque.	48
Figura 32. Esquema neumático.	49
Figura 33. Racor en T y racor de reducción.	49
Figura 34. Calefactor y sonda de temperatura.	50
Figura 35. Módulo de pH.	51
Figura 36. Sensor de intensidad lumínica.	51
Figura 37. Disposición sensores de luz.	52

## LISTA DE ECUACIONES

	pág
Ecuación 1. Ecuaciones de Navier-Stokes.	23
Ecuación 2. Ecuaciones para el modelo de turbulencia k-épsilon.	29
Ecuación 3. Valor de error	30
Ecuación 4. Numero de Reynolds	34
Ecuación 5. Numero de Reynolds. Secciones no circulares.	34
Ecuación 6. Radio Hidráulico	34
Ecuación 7. Caudal	46
Ecuación 8. Relación de compresión	46
Ecuación 9. Potencia del Compresor	46
Ecuación 10. Potencia del Motor.	46

## LISTA DE ANEXOS

	pág
Anexo A. DOMINIOS DE FLUIDO PARA LAS SIMULACIONES	60
Anexo B. SIMULACIONES	63
Anexo C. TABLAS DE SCORING	66
Anexo D. CALCULO DE REYNOLDS	73
Anexo E. CALCULO DEL COMPRESOR	74
Anexo F. CATALOGOS	75
Anexo G. PLANOS	82
Anexo H. CALCULO DE SOLDADURAS	86
Anexo I. ROTAMETROS	88
Anexo J. COSTOS DE INSTRUMENTACION	90

## RESUMEN

Este trabajo presenta el desarrollo de la ingeniería de detalle para el diseño de un fotobioreactor panel plano, teniendo como punto de partida un volumen de trabajo, haciendo uso de herramientas complementarias como software de ingeniería para la dinámica de fluidos computacional (CFD) y simulaciones estructurales.

Basándose en la simulación de flujo para varias geometrías propuestas, se determinó la más idónea para el fotobioreactor, y a partir de esto diseñaron y se seleccionaron los componentes de los sistemas complementarios del equipo. Para ello fue necesario definir los modelos a usar para las simulaciones y los distintos parámetros de estas. Al tratarse de un proceso de diseño mecánico no se tuvieron en cuenta los fenómenos propios del proceso de cultivo al momento de realizarse las simulaciones.

Además, se realizó una selección de los elementos de instrumentación necesarios para la adquisición de datos del proceso y el registro de los cambios en las variables del proceso.

Palabras Clave: CFD, simulación, diseño, cultivo, microalgas, fotobioreactor.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, en la universidad se lleva a cabo proyectos enfocados en el estudio del uso de las microalgas, para lo cual se han desarrollado varios proyectos con el fin de generar reactores que permitan optimizar el proceso de cultivo. Pero hoy en día, los cultivos se realizan en un equipo básico dado que los otros reactores diseñados se encuentran fuera de servicio. El problema radica en que, durante la fase de diseño, se usaron únicamente ecuaciones teóricas y cálculos basados en la transferencia de masa para el equipo, dejando de lado el comportamiento del fluido.

El desarrollo de las herramientas de software para simulación, brinda una herramienta que permite diseñar un equipo mucho más confiable al proveer una aproximación del comportamiento real del fluido bajo las condiciones de operación. En consecuencia, la selección de los equipos del reactor es mucho más precisa gracias a los datos suministrados por estas simulaciones, complementado con metodologías de análisis multicriterio.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Realizar el diseño mecánico de detalle de un Fotobioreactor de panel plano para la generación de biomasa microalgal con un volumen de treinta litros.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar la ingeniería básica para determinar los subsistemas requeridos.
- Desarrollar el diseño detallado del tanque y sus subsistemas.
- Diseñar la estructura soporte del fotobioreactor y sus equipos complementarios.
- Seleccionar la instrumentación de primer nivel para el proceso.
- Elaborar los planos de fabricación, ubicación y equipos auxiliares.

# 1. MARCO TEORICO

## 1.1 FOTOBIOREACTOR

**1.1.1 Definición.** Un Fotobioreactor, es un equipo diseñado para el cultivo de microalgas, el cual debe mantener un ambiente controlado (temperatura, pH, concentración de oxígeno, mezclado, intensidad lumínica, etc.) para garantizar el crecimiento de las mismas, y de este modo obtener biomasa para aplicaciones industriales y ecológicas.

**1.1.2 Parámetros de diseño.** Al momento de diseñar un fotobioreactor es necesario tener en cuenta ciertos factores que son determinantes para garantizar el ambiente requerido para el cultivo adecuado de las microalgas.<sup>1</sup>

**1.1.2.1 Temperatura.**<sup>2</sup> Esta variable es vital para el proceso, ya que puede inhibir el crecimiento del cultivo o ser nociva para las microalgas. Este factor suele verse afectado por el estado del clima y la estación climática en la que se encuentre cuando se trata de un reactor para exteriores. Por ello en este tipo de fotobioreactores es crucial en control de la temperatura, por lo cual suelen emplearse diversos métodos para asegurar que el cultivo se mantenga dentro de los límites de temperatura permitidos (15 a 35 grados Celsius), pero idealmente se mantiene entre 20 y 25 grados Celsius. Algunos métodos son rociar agua en el reactor, instalar un intercambiador de calor (figura 1), sumergir parcialmente el reactor o simplemente poner el reactor bajo sombra, pero sacrificando eficiencia.

Figura 1. Intercambiador de calor para un FBR.



Fuente: (Skjånes, Andersen, Heidorn, & Borgvang, 2016)<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Qingshan Huang, Fuhua Jiang, Lianzhou Wang, & Chao Yang. (2017). Design of photobioreactors for mass cultivation of photosynthetic organisms. *Engineering*, 3(3), 318-329. doi:10.1016/J.ENG.2017.03.020

<sup>2</sup> Franziska Hempel, Andrew S Bozarth, Nicole Lindenkamp, Andreas Klingl, Stefan Zauner, Uwe Linne, . . . Uwe G Maier. (2011). Microalgae as bioreactors for bioplastic production. *Microbial Cell Factories*, 10(1), 81. doi:10.1186/1475-2859-10-81

<sup>3</sup> Skjånes, K., Andersen, U., Heidorn, T., & Borgvang, S. (2016). Design and construction of a photobioreactor for hydrogen production, including status in the field. *Journal of Applied Phycology*, 28(4), 2205-2223. doi:10.1007/s10811-016-0789-4

Cuando se trata de un fotobioreactor para interiores, el control de temperatura es menos intensivo gracias a que no se va a encontrar expuesto directamente a una fuente de calor. Por ello es común ver que en este tipo de fotobioreactores se incorpore un calentador pequeño o directamente no se usen mecanismos para variar la temperatura del cultivo. En caso de tener fuentes lumínicas que generen calor (tales como bulbos incandescentes), se debe usar un método para controlar la temperatura como un intercambiador de calor.

**1.1.2.2 Luz.** La luz solar es un recurso abundante y gratis de la naturaleza, que puede usarse para el cultivo de microalgas de manera comercial. La principal ventaja de la luz solar radica en la reducción de costos que supone para el proyecto. Por otra parte, es un recurso muy dependiente de factores como el clima, la hora del día y la región geográfica donde se ubica el fotobioreactor. Es crucial que la luz que se suministre sea de calidad ya que de esto depende significativamente el crecimiento del cultivo. Dado que este fotobioreactor está destinado para uso en interiores, la luz debe aportarse de manera artificial. Algunas maneras de hacerlo son a través de bulbos incandescentes, lámparas halógenas, LED's, fibra óptica, etc. Varios factores deben tenerse en cuenta cuando se selecciona la fuente de luz. La longitud de onda debe encontrarse dentro del espectro visible (entre 400 – 700 nm)<sup>4</sup>, pero algunas longitudes han mostrado tener mejores efectos sobre el cultivo, caso de la luz roja. Aunque hay estudios que sugieren también el uso de luz azul<sup>5</sup>.

Uno de los problemas de la iluminación radica en la cantidad de luz que se suministre, ya que cuando se sobrepasa cierto valor en la intensidad suministrada se presenta un fenómeno denominado fotoinhibición. Este fenómeno genera un crecimiento microalgal negativo y un desperdicio de la luz. Por el contrario, si la intensidad se encuentra por debajo de un valor crítico, el cultivo será fotolimitado restringiendo el crecimiento de las microalgas y colapsando el cultivo.

Una característica de los sistemas de iluminación es la poca penetración que puede tener en el cultivo (figura 2), en especial con concentraciones elevadas de microalga (10 g/L). Esto genera una segmentación<sup>6</sup> del reactor en tres partes: una zona fotoinhibida cerca a la pared donde se ubica la iluminación y donde se registran bajas tasas de crecimiento; una zona intermedia donde la cantidad de luz se encuentra dentro de los valores óptimos para microalga y finalmente una zona oscura, donde la luz ya no llega y la tasa de crecimiento es negativa.

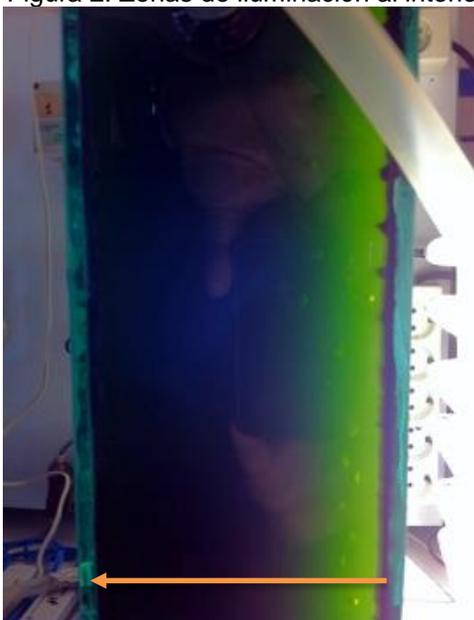
---

<sup>4</sup> Wang, S., Stiles, A. R., Guo, C., & Liu, C. (2014). Microalgae cultivation in photobioreactors: An overview of light characteristics. *Engineering in Life Sciences*, 14(6), 550-559. doi:10.1002/elsc.201300170

<sup>5</sup> Atta, M., Idris, A., Bukhari, A., & Wahidin, S. (2013). Intensity of blue LED light: A potential stimulus for biomass and lipid content in fresh water microalgae *Chlorella vulgaris*. *Bioresource Technology*, 148, 373-378. doi:10.1016/j.biortech.2013.08.162

<sup>6</sup> Naderi, G., Znad, H., & Tade, M. O. (2017). Investigating and modelling of light intensity distribution inside algal photobioreactor. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 122, 530-537. doi:10.1016/j.cep.2017.04.014

Figura 2. Zonas de iluminación al interior de un FBR.



En la imagen se puede apreciar la escasa penetración de luz, en este caso el grosor del reactor es de 5cm.<sup>7</sup>

**1.1.2.3 Mezclado.**<sup>8</sup> El mezclado es otra variable importante ya que evita problemas de sedimentación y gradientes en el cultivo. Un mezclado correcto y eficiente permite una distribución homogénea de los nutrientes y proporciona control sobre los ciclos de luz-oscuridad. Además, evita la sedimentación y la creación de zonas muertas en el FBR. Para el flujo en el interior del fotobioreactor se recomiendan velocidades entre 20 y 50 cm/s<sup>9</sup>, ya que velocidades mayores provocan daños en el cultivo. El mezclado principalmente se puede realizar mediante la inyección de aire enriquecido en CO<sub>2</sub> o por bombeo, además de la inclusión de mezcladores<sup>10</sup> dinámicos (como un impeler) o estáticos (como deflectores). Algunas investigaciones muestran que la productividad de un cultivo puede incrementar hasta 1.7 veces cuando se incluye un mezclado radial con medios mecánicos a una columna de burbujas.

<sup>7</sup> Tomada de: <https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/tema-1---generalidades/1-6-interaccion-con-la-luz.html>

<sup>8</sup> Franziska Hempel, Andrew S Bozarth, Nicole Lindenkamp, Andreas Klingl, Stefan Zauner, Uwe Linne, . . . Uwe G Maier. (2011). Microalgae as bioreactors for bioplastic production. *Microbial Cell Factories*, 10(1), 81. doi:10.1186/1475-2859-10-81

<sup>9</sup> Qingshan Huang, Fuhua Jiang, Lianzhou Wang, & Chao Yang. (2017). Design of photobioreactors for mass cultivation of photosynthetic organisms. *Engineering*, 3(3), 318-329. doi:10.1016/J.ENG.2017.03.020

<sup>10</sup> Yang, Z., Cheng, J., Xu, X., Zhou, J., & Cen, K. (2016). Enhanced solution velocity between dark and light areas with horizontal tubes and triangular prism baffles to improve microalgal growth in a flat-panel photo-bioreactor. *Bioresource Technology*, 211, 519-526. doi:10.1016/j.biortech.2016.03.145

**1.1.2.4 pH.** El pH es una variable que debe vigilarse a lo largo del proceso, debido a que, si el pH no se encuentra dentro de un rango óptimo, puede interferir con los procesos celulares y perjudicar el cultivo. Dicho rango óptimo depende del alga con que se trabaje, donde el rango óptimo de trabajo es entre 8.2 a 8.5, aunque algunas algas pueden trabajar en un pH más bajo de hasta 7.3 (*Chlamydomonas reinhardtii* CC125<sup>11</sup>) y en general se puede tomar un rango de trabajo entre 7 y 9. Actualmente para algunas aplicaciones se utiliza una inyección de aire enriquecido con CO<sub>2</sub>, lo cual contribuye al cambio de pH en el cultivo aumentando la importancia en el control de este.

**1.1.2.5 Costos.**<sup>12</sup> Este es uno de los principales puntos que restringe la explotación comercial de este proceso. Es necesario que además de cumplir todos los requerimientos anteriores, se haga con los costos más bajos posibles. El problema radica en que, para grandes producciones los costos estructurales pueden elevarse. Además, deben considerarse los servicios adicionales que se requieren para el control de temperatura, mezclado y aireación. Por ello, condiciones operativas mal calculadas puede generar gastos adicionales de los recursos ya mencionados, además de perjudicar el proceso.

Otro factor que puede afectar estos costos es la limpieza y mantenimiento del reactor, ya que el ensuciamiento que se genera debido al proceso puede afectar el rendimiento del reactor. Recientemente, con la inclusión de deflectores internos para mejorar el mezclado, se incrementa la dificultad no solo en la limpieza sino además en posibles reparaciones que deban hacerse al reactor. Cabe mencionar que estos diseños deben caracterizarse por una larga vida útil para garantizar la rentabilidad del proyecto.

**1.1.3 Fotobioreactor panel plano.**<sup>13</sup> Es una de las mejores geometrías, dado que dentro de sus principales ventajas se encuentra la alta relación de área irradiada/volumen. También se caracteriza por un bajo consumo energético en referencia al sistema de agitación y bajos esfuerzos mecánicos sobre las microalgas del cultivo. Además, el manejo de la temperatura es mucho más sencillo, ya que generalmente basta con la atomización de agua sobre la superficie irradiada, aunque también pueden ser sumergidos parcialmente en piscinas de agua. En la actualidad, se ha demostrado que la inclusión de mezcladores internos puede elevar la productividad de estos reactores.

---

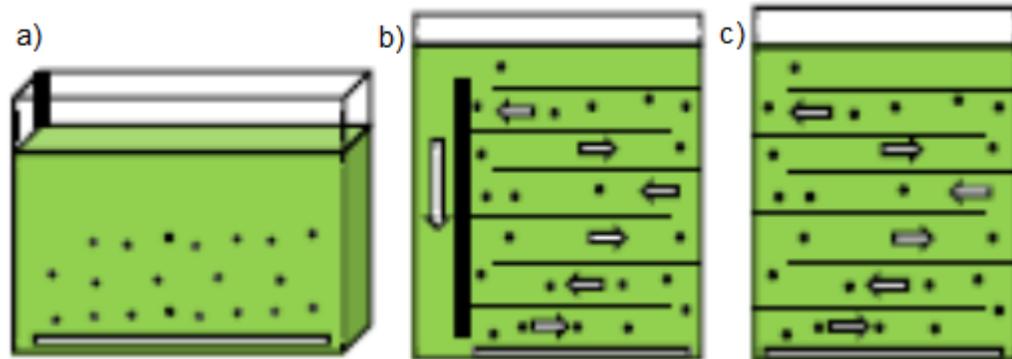
<sup>11</sup> Berberoglu, H., Pilon, L., & Melis, A. (2008). Radiation characteristics of *chlamydomonas reinhardtii* CC125 and its truncated chlorophyll antenna transformants tla1, tlaX and tla1-CW. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(22), 6467-6483. doi:10.1016/j.ijhydene.2008.07.071

<sup>12</sup> Issarapayup, K., Powtongsook, S., & Pavasant, P. (2011). Economical review of *haematococcus pluvialis* culture in flat-panel airlift photobioreactors. *Aquacultural Engineering*, 44(3), 65-71. doi:10.1016/j.aquaeng.2011.03.002

<sup>13</sup> Gupta, P., Lee, S., & Choi, H. (2015). A mini review: Photobioreactors for large scale algal cultivation. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 31(9), 1409-1417. doi:10.1007/s11274-015-1892-4

Otras geometrías comunes son la tubular, cuyas principales desventajas son la dificultad en el control de la temperatura y los grandes gradientes de CO<sub>2</sub> que se presentan.<sup>14</sup>

Figura 3. Variaciones geométricas del FBR Panel Plano. a) Simple; b) Tipo Airlift; c) Mezcladores internos.



Fuente: Elaboración propia.

## 1.2 SIMULACIONES CFD

**1.2.1 Definición.** Estas simulaciones permiten la aproximación de problemas de ingeniería relacionados con dinámica de fluidos, mediante la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes de manera numérica. Actualmente existen diversos programas disponibles, donde la principal limitación radica en la necesidad de una licencia cuando se habla de los más completos. A pesar de esto, algunos programas pueden usarse con fines educativos bajo licencias estudiantiles.

Para este proyecto el programa usado fue ANSYS en su versión 19.1, más específicamente el módulo para CFD Fluent. Este programa se utilizó bajo licencia estudiantil.

## 1.3 SIMULACIONES ESTRUCTURALES

**1.3.1 Definición.** Estas simulaciones permiten conocer el comportamiento aproximado de un cuerpo sólido bajo determinado estado de cargas. Se basan principalmente en el uso de métodos numéricos para dar solución a los problemas a solucionar. En este proyecto se usó NX12.0 de Siemens, que se basa en el uso de elementos finitos como método de solución.

<sup>14</sup> Qingshan Huang, Fuhua Jiang, Lianzhou Wang, & Chao Yang. (2017). Design of photobioreactors for mass cultivation of photosynthetic organisms. *Engineering*, 3(3), 318-329. doi:10.1016/J.ENG.2017.03.020

## 1.4 ECUACIONES DE NAVIER-STOKES

**1.4.1 Definición.**<sup>15,16,17</sup> Las ecuaciones de Navier Stokes hacen parte de los problemas del milenio debido a la ausencia de una solución estas ecuaciones. Este grupo de ecuaciones está conformado por derivadas parciales que se encargan de describir el comportamiento de un flujo. La ecuación trabaja el flujo en 3 dimensiones y básicamente describe la región del fluido y las fuerzas que afectan a dicho flujo (presión, tensión y fuerzas de cuerpo). En la actualidad es posible resolver mediante métodos numéricos un problema de dinámica de fluidos con las ecuaciones de Navier-Stokes con procesos iterativos convergentes. La principal dificultad de estas ecuaciones se encuentra en que son altamente no lineales, principalmente debido a que no existe una correlación entre la presión y la velocidad.

Ecuación 1. Ecuaciones de Navier-Stokes.<sup>18</sup>

$$\begin{aligned}\rho\left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u \cdot \nabla u_i\right) &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \Delta u_i + f_\varepsilon^i \\ \nabla \cdot u &= 0 \\ \rho_t + u \cdot \nabla \rho &= 0\end{aligned}$$

## 1.5 METODOLOGIA DE SCORING

**1.5.1 Definición.**<sup>19</sup> Es un método que permite abordar problemáticas con altos niveles de incertidumbre o con escasez de información. Se basa en el uso de una función de valor para evaluar cada alternativa. Es un método propenso a la manipulación en la asignación de peso a los criterios de evaluación.

**1.5.2 Etapas.** El proceso de Scoring tiene 6 etapas:

- A. Identificar la meta del proyecto.
- B. Establecer las alternativas de solución.
- C. Enumerar los criterios de evaluación para las alternativas propuestas.
- D. Asignar un peso a cada criterio de evaluación, de manera consecuente a la importancia de cada uno.

---

<sup>15</sup> Diego Córdoba. *Las ecuaciones de navier-stokes I*

<sup>16</sup> Mora, X. (2017, -07-07T14:08:58+00:00). Las ecuaciones de navier-stokes. Retrieved from <https://metode.es/revistas-metode/monograficos/equacions-navier-stokes.html>

<sup>17</sup> Maldonado, C. E. ¿Qué dice la ecuación Navier–Stokes? Retrieved from <https://www.desdeabajo.info/ciencia-y-tecnologia/item/25725-que-dice-la-ecuacion-navier-stokes.html>

<sup>18</sup> Diego Córdoba. *Las ecuaciones de navier-stokes I*

<sup>19</sup> Abordar situaciones de incertidumbre o con pocos niveles de, & información. *Ponderación lineal (scoring)*

- E. Evaluar las alternativas, definiendo el valor de satisfacción de cada alternativa en relación a cada criterio.
- F. Calcular el Score para cada alternativa. La alternativa con el mejor ponderado es la más recomendable.

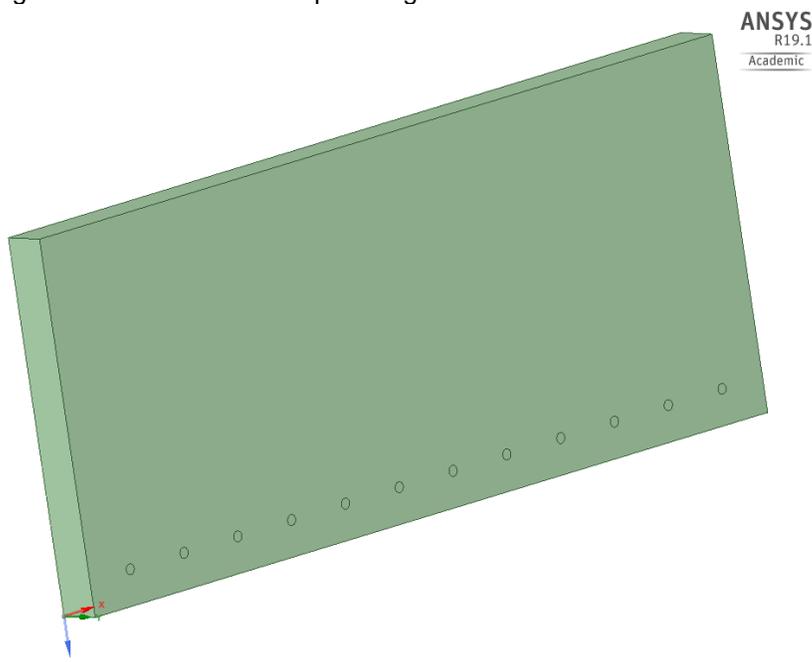
## 2. DISEÑO DETALLADO DEL TANQUE

### 2.1 FORMULACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA LA GEOMETRÍA

Dado que la geometría del tanque juega un papel determinante dentro del desempeño del reactor, realizar una correcta selección de esta es fundamental. Para ello, se realizó la formulación de 3 geometrías, teniendo en cuenta que la forma base debe ser tipo panel plano y debe tener un volumen de 30L, donde el 70% de este debe ser operativo. A continuación, se describen las alternativas propuestas.

**2.1.1 Fotobioreactor Panel Plano.** Este diseño de los más usados, dada la sencillez de la geometría y las ventajas que puede ofrecer en comparación con otras geometrías. Para este caso, el volumen es de 21L operativos y la inyección de aire se realizará mediante acoples neumáticos laterales en la parte inferior del reactor. En el anexo A1 se muestra la disposición de la geometría y la ubicación de las inyecciones de aire.

Figura 4. Dominio de fluido para la geometría Panel Plano.



Fuente: Elaboración propia.

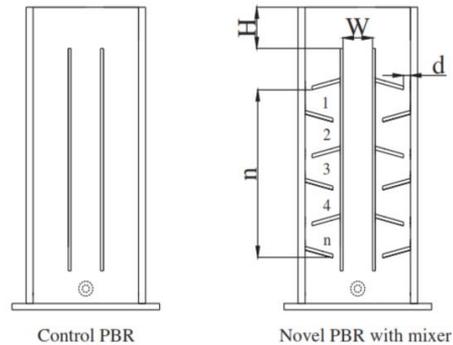
**2.1.2 Fotobioreactor tipo Airlift.**<sup>20</sup> Esta geometría se encuentra fuertemente influenciada por investigaciones recientes, que argumentan que la generación de un flujo circular en el interior del reactor eleva la productividad y mejora los tiempos

---

<sup>20</sup> Yang, W., Yang, Z., Cheng, J., Zhou, J., & Cen, K. (2016). Developing a water-circulating column photobioreactor for microalgal growth with low energy consumption. *Bioresource Technology*, 221, 492-497. doi:10.1016/j.biortech.2016.09.071

de mezclado. Para ello básicamente se toma el reactor convencional y se divide en dos partes: una corriente de ascenso (Riser) y una corriente de descenso (Downcomer). Adicional a esta división, es posible agregar mezcladores internos que favorecen aún más la productividad del fotobioreactor. En la figura 5, se puede observar un ejemplo de un reactor tipo Airlift, que cuenta con un Riser y 2 Downcomer.

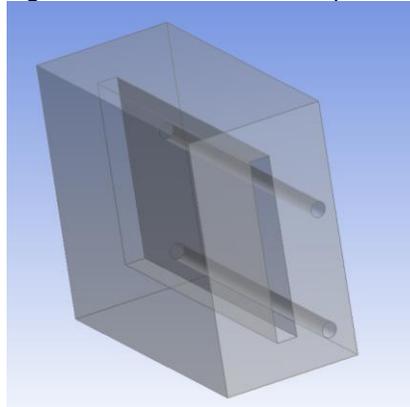
Figura 5. Disposiciones para una geometría tipo Airlift.



Fuente: (HUANG et al., 2015)<sup>21</sup>

La primera alternativa se basa en este concepto sin la inclusión de mezcladores internos. Debido al volumen de trabajo, se optó por usar dos inyecciones de aire, una en la parte baja del Riser y otra más cerca de la superficie libre el fluido. Dado que los programas para CFD trabajan con el modelado del dominio del fluido y no con la pieza en sí, en la figura 6, se muestra el dominio modelado para este reactor. Revisar anexo A2 para observar más detalladamente las dimensiones.

Figura 6. Dominio del fluido para la geometría tipo Airlift.

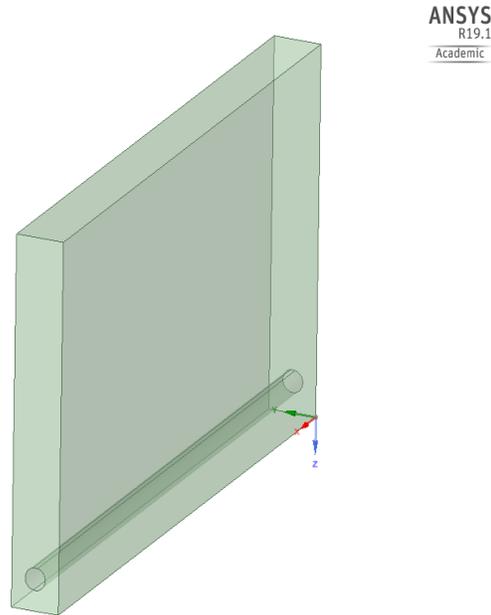


Fuente: Elaboración propia.

<sup>21</sup> Huang, J., Ying, J., Fan, F., Yang, Q., Wang, J., & Li, Y. (2016). Development of a novel multi-column airlift photobioreactor with easy scalability by means of computational fluid dynamics simulations and experiments. *Bioresource Technology*, 222, 399-407. doi:10.1016/j.biortech.2016.09.109

**2.1.3 Fotobioreactor Panel Plano Volumen dividido.** La base de este diseño es la geometría tipo panel plano sencilla, como la alternativa anterior. Con el objetivo de dar mayor versatilidad al equipo, se dividió el volumen en 3 reactores de menor tamaño, con una capacidad 10 litros por reactor (figura 7). Esto con la finalidad de realizar cultivos en paralelo, donde cada reactor trabaja de manera independiente bajo distintas condiciones de operación. La inyección de aire se realizó mediante una flauta de inyección ubicada en la parte inferior del reactor. Revisar anexo A3.

Figura 7. Dominio de fluido individual para el reactor panel plano dividido.



Fuente: Elaboración propia.

## 2.2 CONDICIONES DE FLUJO

El criterio de evaluación será la velocidad de flujo, dado que de esta depende la generación de zonas muertas y otros problemas asociados. Como se mencionó anteriormente, las velocidades recomendadas oscilan entre 20 y 50 cm/s. Para este caso, las velocidades máximas se deben encontrar próximas a los 27 cm/s, dato establecido por los docentes investigadores<sup>22</sup>. Para el caso del reactor tipo Airlift, se da una condición de velocidad mínima dada la importancia que tiene la circulación de flujo en este. Este dato se estableció en 9 cm/s.

## 2.3 SIMULACIÓN DE CFD PARA LAS GEOMETRÍAS PROPUESTAS

A continuación, se explicará la configuración de los parámetros usados en las simulaciones.

---

<sup>22</sup> Basado en: (Guo, Yao, & Huang, 2015)

**2.3.1 Consideraciones.**<sup>23,24,25</sup> Dada la existencia de 3 fases en el proceso (sólido, líquido y gas), es necesario simplificar la complejidad del problema ya que esto permitirá reducir el costo computacional y no todos los factores del proceso son útiles para los fines del proyecto. Por esto una de las principales simplificaciones consiste en tener en cuenta únicamente la fase líquida y la fase gaseosa, tomándose como referencia el agua y el aire respectivamente (las propiedades son las dadas por la librería de materiales de Fluent®). Además, se despreciaron otros fenómenos asociados al proceso como de transferencia de masa, transferencia de calor, etc.

Para el modelado del problema se usó la presión atmosférica de Bogotá, estimada en 560 mmHg y se aplicó gravedad, como el valor estándar de  $9.810 \text{ m/s}^2$ . Aunque para este proyecto se usó como variable de entrada la presión de inyección, dado que no hay una correlación entre velocidad y presión, es posible cambiar esta condición de presión directamente por una condición de velocidad. Además, sobre las superficies libres del fluido, se usó una condición de apertura o salida de presión, con la finalidad de permitir la liberación del gas inyectado.

Finalmente, se realizaron las simulaciones en estado transitorio, con el objetivo de observar de manera aproximada la formación del perfil de flujo en el reactor. Por ello, se usó una formulación implícita cuando se seleccionó el modelo para el problema. En tiempo real se simularon 5 segundos de flujo, los cuales se dividieron en 500 pasos temporales de 0.01s. Además, para mejorar la convergencia de la solución se estableció un número de 40 iteraciones por paso temporal.

**2.3.2 Procedimiento de simulación.** Teniendo ya definidas las geometrías, se realizaron 4 simulaciones por cada geometría. En cada una se varió el tamaño de los elementos de la malla para realizar una posterior convergencia de malla. Además, se generaron los perfiles de velocidad con los cuales se evaluó posteriormente la idoneidad de cada geometría.

Para determinar las presiones de entrada, se realizaron simulaciones previas con un tamaño de malla estimado. Para este caso se tomó un tamaño de malla de 2mm para todas las geometrías y los resultados de la presión se muestran en la tabla 1.

---

<sup>23</sup> K.H.AL-Mashhadani, M., J.Wilkinson, S., & B.Zimmerman, W. Airlift bioreactor for biological applications with microbubblemediated transport processes. *Chemical Engineering Science*,

<sup>24</sup> Huang, J., Ying, J., Fan, F., Yang, Q., Wang, J., & Li, Y. (2016). Development of a novel multi-column airlift photobioreactor with easy scalability by means of computational fluid dynamics simulations and experiments. *Bioresource Technology*, 222, 399-407. doi:10.1016/j.biortech.2016.09.109

<sup>25</sup> Huang, J., Feng, F., Wan, M., Ying, J., Li, W., Li, Y., . . . Shen, G. (2015). Improving performance of flat-plate photobioreactors by installation of novel internal mixers optimized with computational fluid dynamics. *Bioresource Technology*, 182, 151-159. doi:10.1016/j.biortech.2015.01.067

Tabla 1. Presiones de inyección.

Geometría	Presión manométrica (Pa)
Airlift	100
Panel Plano	50
Panel Plano Volumen Dividido	40

Fuente: Elaboración propia.

**2.3.3 Modelos usados.**<sup>26</sup> Debido a la presencia de dos fases, hay diversos modelos matemáticos usados para solución de los problemas de este tipo. Para este caso hay dos modelos posibles: el modelo Euleriano y el modelo VOF. El primero se basa en la solución de las ecuaciones de transporte y conservación para cada fase de manera independiente, para posteriormente realizar el acople del flujo combinado. El segundo modelo (Volume Of Fluid), a diferencia del Euleriano, toma ambos fluidos como un solo volumen y resuelve las ecuaciones para ese único volumen. Este es un modelo muy usado en la caracterización del comportamiento de las burbujas. Para este proyecto se usó el modelo Euleriano, ya que describe de mejor manera la interacción entre los fluidos, en especial al ser de fases distintas. Por esto se requirió de la tensión superficial del agua, cuyo valor es 0.0736 N/m.

Además, para el modelo de turbulencia, se encontró que el modelo k-épsilon es uno de los más sencillos y es adecuado para muchas de las aplicaciones de ingeniería. Este modelo agrega dos ecuaciones de transporte más al problema: una encargada de la cinética de la turbulencia (k) y la otra de la disipación de la turbulencia (épsilon). Esto agrega un poco más de costo computacional, pero ofrece una descripción más precisa del fenómeno que se desea simular.

Ecuación 2. Ecuaciones para el modelo de turbulencia k-épsilon.

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v}k)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + P_k + G_k - \rho\varepsilon - Y_M$$

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}\varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v}\varepsilon)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} [P_k + C_{3\varepsilon} G_k] - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

**2.3.4 Malla.** En cuanto al tipo de malla usada, se usó el enmallador por defecto de ANSYS ya que se observó que arrojaba mallas de buena calidad y realizaba mallas

<sup>26</sup> Huang, J., Ying, J., Fan, F., Yang, Q., Wang, J., & Li, Y. (2016). Development of a novel multi-column airlift photobioreactor with easy scalability by means of computational fluid dynamics simulations and experiments. *Bioresource Technology*, 222, 399-407. doi:10.1016/j.biortech.2016.09.109

estructuradas en las situaciones que así lo permitían. Se usaron elementos lineales con la finalidad de no elevar innecesariamente el costo computacional. En cuanto a los elementos usados, se dejaron los usados por el enmallador. La proporción usada para el refinamiento fue de 2, queriendo decir que, si la primera malla era de 8mm la siguiente sería de 4mm. Todas las simulaciones se iniciaron con una malla de 8mm y se realizó el respectivo refinamiento, como muestra la tabla 2.

Tabla 2. Tamaños de malla

<b>Geometría</b>	<b>Tamaño de malla (mm)</b>				
Airlift	8	4	2	1	0.8
Panel Plano	16	8	4	2	1
Panel Plano pequeño	8	4	2	1	0.5

Fuente: Elaboración propia.

En el caso del reactor tipo Airlift, un valor de 0.5mm exigía un costo computacional elevado, por lo cual para mantener el número de simulaciones se optó por un valor que requiriera menor costo, siendo el valor de 0.8mm. En cuanto al reactor Panel Plano, debido a que las inyecciones son de tamaño reducido y son una zona donde se requiere capturar la mayor cantidad información posible, un valor de 0.5mm requería demasiado costo por lo cual se reemplazó por una malla de 16mm. Las simulaciones de esta geometría se caracterizaron por tener un costo siempre elevado por lo explicado anteriormente.

**2.3.5 Convergencia de malla.** La convergencia de malla es un proceso que permite asegurar la veracidad de los resultados obtenidos de una simulación. Básicamente consiste en la comparación de los valores de varias simulaciones con un valor de referencia para poder hallar un error y poder establecer la confiabilidad del resultado. La convergencia se realiza sobre la variable o variables de interés, que para este caso es la velocidad. Idealmente el valor de referencia es el valor teoría del problema o en su defecto el valor de un análisis transitorio. Para este caso, al no tener ninguno de estos valores, la convergencia se realiza comparando el valor de la simulación actual con el valor de la simulación anterior, como se muestra en la ecuación 3.

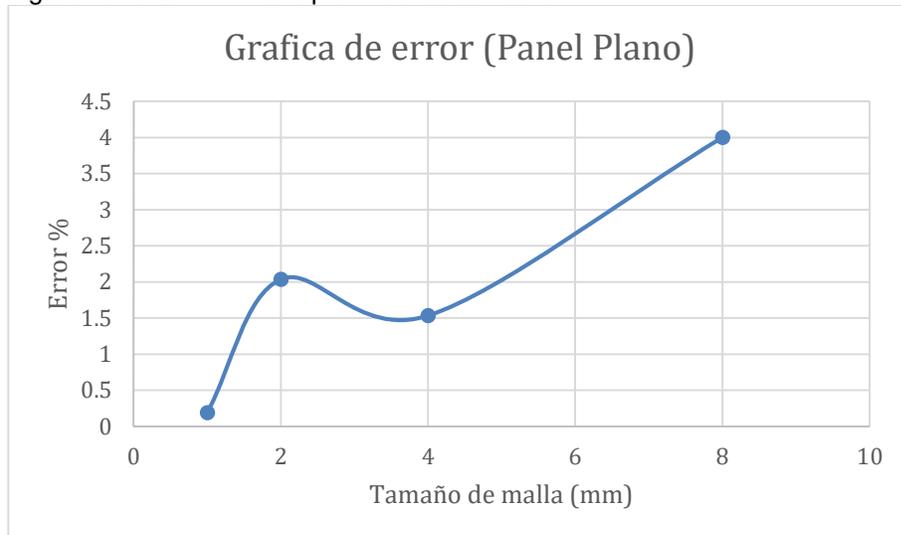
Ecuación 3. Valor de error

$$Valor\ de\ error(\%) = ABS\left(\frac{Valor\ Actual - Valor\ Anterior}{Valor\ Actual}\right) * 100$$

En el anexo B, se muestran con detalle los valores resultado de la convergencia para las distintas geometrías. Como valor de comparación se usó la velocidad máxima de la simulación. Como resultado de la simulación se obtuvieron valores puntuales de la velocidad del agua de hasta 44 cm/s, pero no figuran en los perfiles de velocidad, por lo cual solo se tomaron como valores de referencia para la

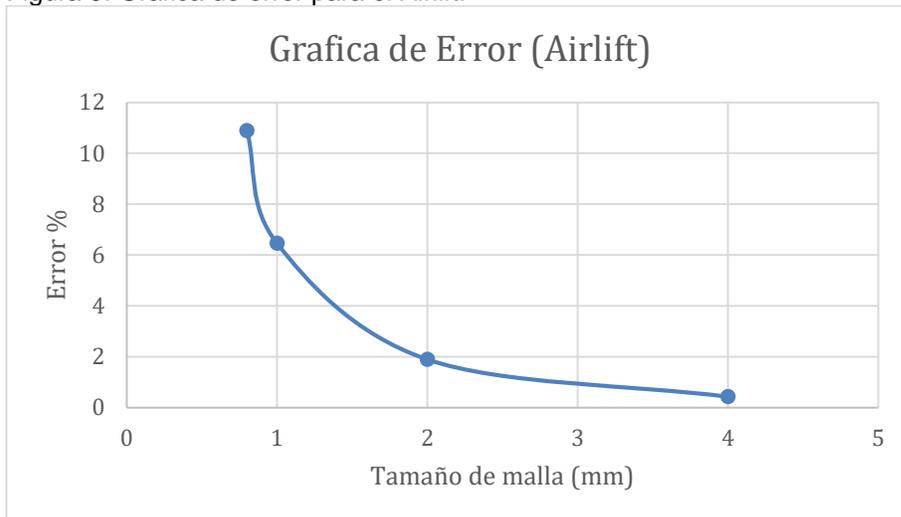
convergencia de malla. En las figuras 8, 9 y 10 se muestra el comportamiento del error para las simulaciones en las tres geometrías.

Figura 8. Grafica de error para el Panel Plano.



Fuente: Elaboración propia.

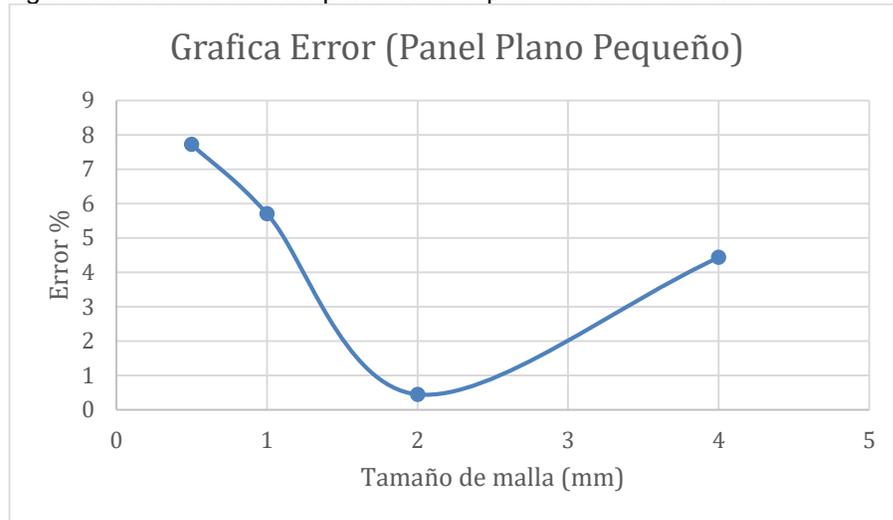
Figura 9. Grafica de error para el Airlift.



Fuente: Elaboración propia.

Para la generación de los perfiles de velocidad se tomó la malla que generara un error por debajo del 1%. En la figura 9 y 10 se puede observar que la convergencia después de cierto tamaño de malla, muestra una tendencia a aumentar el valor del error. Esto se conoce como error de truncamiento y evidencia una malla fina no necesariamente genera buenos resultados.

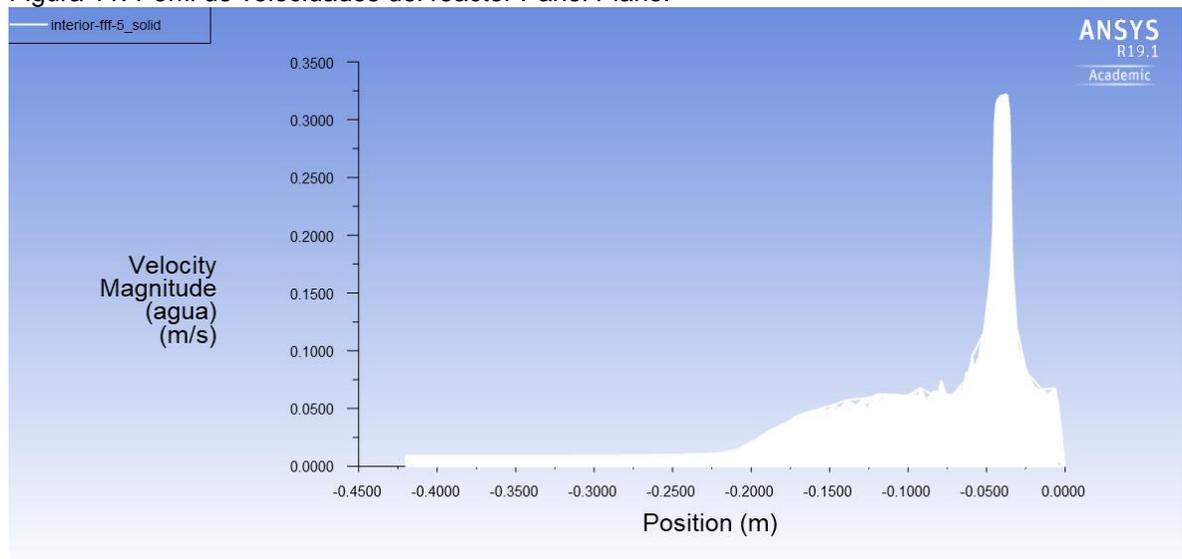
Figura 10. Grafica de error para el Panel plano volumen dividido.



Fuente: Elaboración propia.

**2.3.6 Perfiles de Velocidad.** A continuación, se muestran los perfiles de velocidad producto de las simulaciones de fluidos. El eje graficado en la figura 11 corresponde a la altura del nivel de fluido (420mm). Se puede observar un pico de velocidad de hasta 32 cm/s que concuerda con la inyección de aire. También es posible ver una clara segmentación de la velocidad en el reactor, donde en la parte superior las velocidades no superan los 2 cm/s. Gracias a la uniformidad en la distribución de las velocidades, no se observó que ninguna zona fuera propensa a sedimentación.

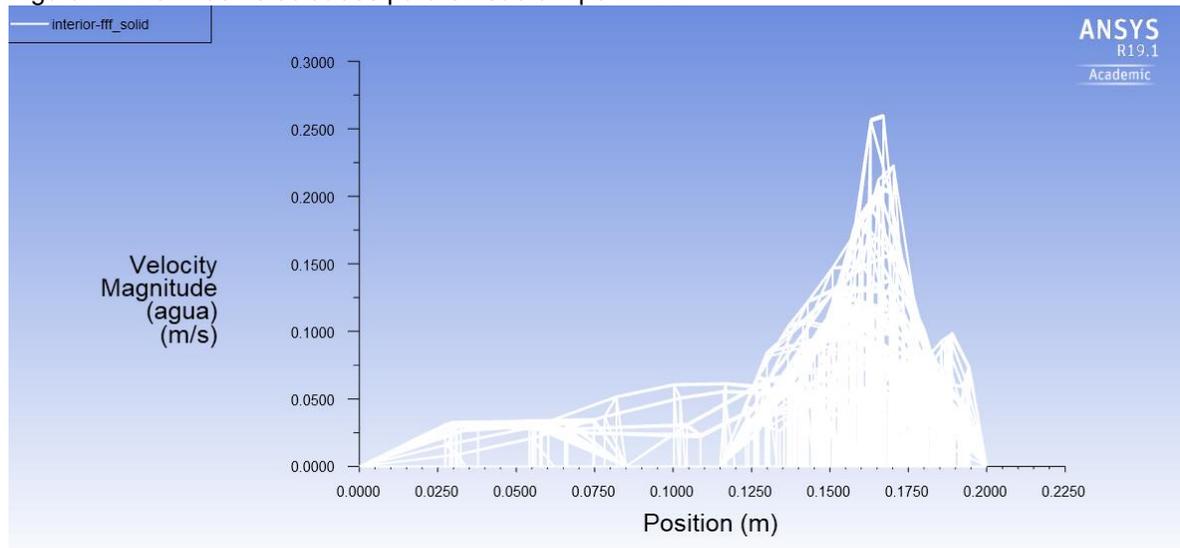
Figura 11. Perfil de velocidades del reactor Panel Plano.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 12 se muestra el perfil correspondiente a las velocidades en el reactor tipo Airlift, donde el eje graficado es el ancho del reactor ya que es de interés conocer el comportamiento de la velocidad del agua en la corriente del Riser y del Downcomer. Como se puede observar, las velocidades en la zona del Riser son más que acordes a los rangos establecidos anteriormente. El problema de esta geometría radica en el Downcomer, donde se obtuvo que la velocidad no alcanza a superar el valor mínimo establecido de 9cm/s. Esto puede representar problemas de sedimentación y zonas muertas durante el proceso, por lo cual esta geometría se tuvo que descartar.

Figura 12. Perfil de velocidades para el reactor tipo Airlift.



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la figura 13 muestra el perfil del reactor Panel Plano dividido en volúmenes de 10L. Al igual que en el caso del reactor Panel Plano, el eje graficado corresponde a la altura del nivel de fluido. Observando la gráfica se puede notar que el comportamiento de las velocidades es similar al comportamiento del panel plano. La principal diferencia radica en la zona que se encuentra por debajo del pico de velocidad producto de la inyección de aire. Las velocidades en esta zona son realmente bajas, lo que supone un riesgo de sedimentación en la base del reactor. Esto se debe a la presencia de una flauta de inyección en el interior del reactor, lo que obstaculiza el movimiento del fluido, descartando esta geometría.

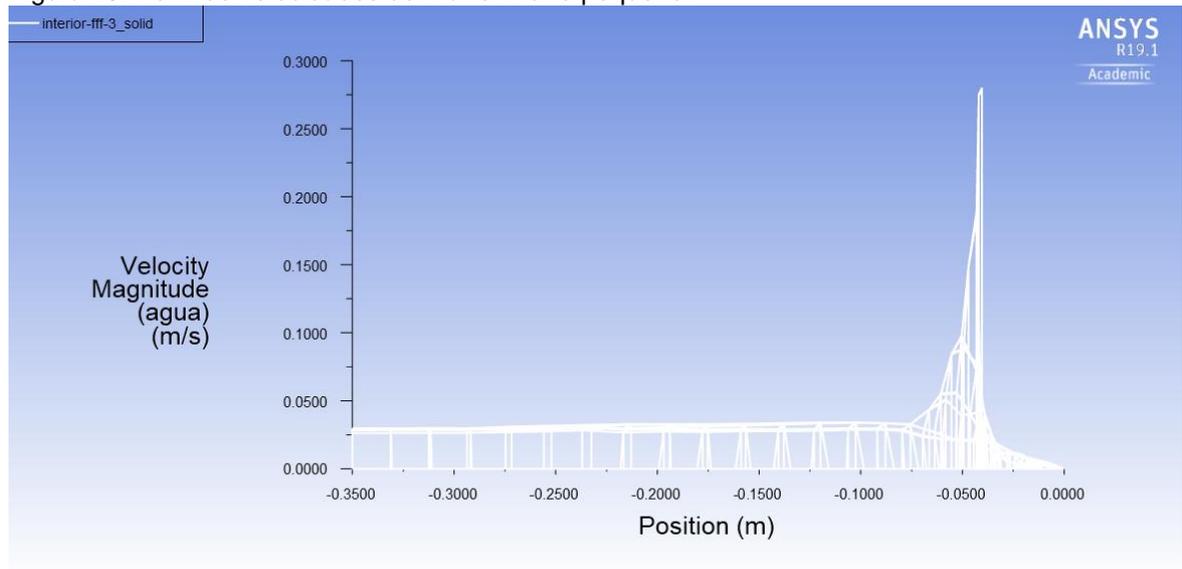
Las simulaciones permiten concluir que el reactor tipo Panel Plano es la mejor geometría para el reactor. Además, en el anexo C1 se encuentra una tabla de Scoring, donde se consideraron otros ítems para evaluar las alternativas propuestas como la dificultad para el mantenimiento, el espacio ocupado y la flexibilidad del equipo. Estos ítems son elementos importantes que también deben ser tomados en cuenta para realizar una adecuada selección de la geometría para el reactor.

**2.3.7 Régimen de flujo.** Una vez seleccionada la geometría para el reactor, se realizó una gráfica con el régimen de flujo en el reactor. Usualmente el número de Reynolds se puede calcular mediante la ecuación 4. Donde  $\rho$  es la densidad del fluido,  $D$  es el diámetro de la tubería,  $V$  es la velocidad del fluido y  $\mu$  es la viscosidad dinámica.

Ecuación 4. Numero de Reynolds

$$Re = \frac{\rho * D * V}{\mu}$$

Figura 13. Perfil de velocidades del Panel Plano pequeño.



Fuente: Elaboración propia.

Debido a que la geometría de trabajo no es un ducto, es necesario calcular un diámetro equivalente o radio hidráulico. Para calcularlo se usa la ecuación 5, donde  $Rh$  es el radio hidráulico, calculado con la ecuación 6;  $V$  es la velocidad del fluido y  $\nu$  es la viscosidad cinemática.

Ecuación 5. Numero de Reynolds. Secciones no circulares.

$$Re = \frac{4 * V * Rh}{\nu}$$

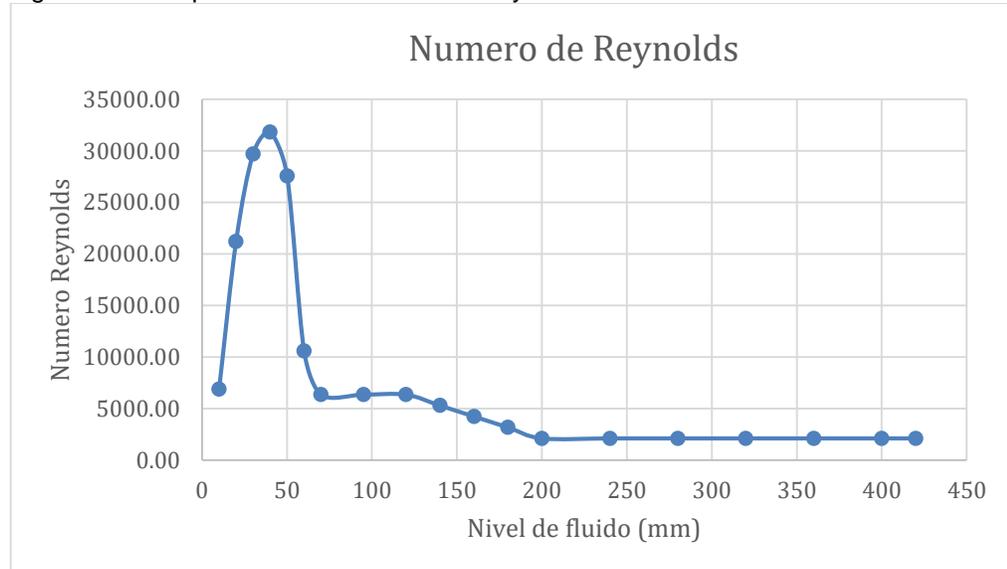
Ecuación 6. Radio Hidráulico

$$Rh = \frac{\text{Area de flujo}}{\text{Perimetro mojado}}$$

En la figura 14 se muestra la gráfica de comportamiento del número de Reynolds, donde el eje graficado es el correspondiente a la altura del nivel de fluido. Como se puede ver en la gráfica, hay presencia de turbulencia en la zona baja del reactor, correspondiente a la zona de inyección de aire. A medida que aumenta la altura del

nivel la turbulencia disminuye, hasta llegar a un estado de flujo laminar en la mitad superior del reactor.

Figura 14. Comportamiento Numero de Reynolds.



Fuente: Elaboración propia.

## 2.4 SIMULACIÓN ESTRUCTURAL DEL TANQUE

Una vez definida la geometría del tanque, se debe seleccionar el material indicado para realizar la construcción, donde los espesores de cada lamina están relacionados directamente con el volumen máximo a contener. Por eso es importante realizar una simulación estructural que permita determinar la conveniencia del material seleccionado y evitar futuras fallas. Sumado a lo anterior, es importante que las láminas del material seleccionado no tengan un espesor muy elevado, debido a que pueden llegar a afectar el nivel de incidencia de la luz, lo cual afecta negativamente al cultivo.

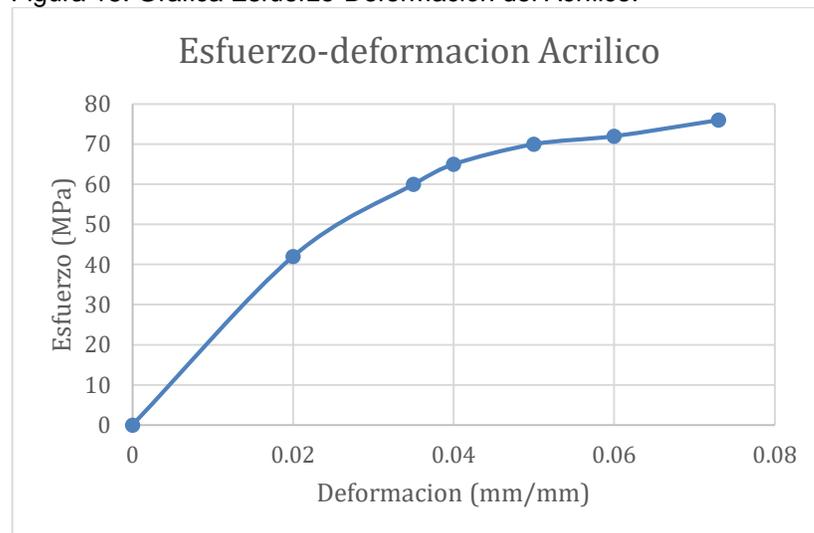
El material seleccionado para realizar la construcción del tanque es acrílico<sup>27</sup> transparente, gracias a sus propiedades como brillo, transparencia y translucidez, cualidades muy similares a las del vidrio, pero con ventajas adicionales como hasta la mitad del peso del vidrio y hasta 10 veces más resistente a impactos. Adicionalmente es muy resistente al ambiente y puede durar hasta 10 años sin que se presente cristalización y coloración amarilla. Para la elaboración del equipo se seleccionaron láminas de acrílico de 6 mm de espesor, el cual va estar adherido por

<sup>27</sup> Skjånes, K., Andersen, U., Heidorn, T., & Borgvang, S. (2016). Design and construction of a photobioreactor for hydrogen production, including status in the field. *Journal of Applied Phycology*, 28(4), 2205-2223. doi:10.1007/s10811-016-0789-4

medio de cemento acrílico. En el anexo C2 se puede detallar la tabla de Scoring mediante la cual se seleccionó el acrílico como material para el tanque.

**2.4.1 Consideraciones.** Para estas simulaciones se usó el programa NX 12.0 de Siemens. En el análisis mecánico se consideró el diagrama esfuerzo deformación del material (figura 15)<sup>28 29</sup>, con la finalidad de aproximar la solución a una situación real de operación. En este análisis no se tomó en cuenta la presión ambiente, únicamente se tomó en cuenta la presión hidrostática que genera el fluido. Dado que el material de trabajo es un polímero, además de usar la tabla de esfuerzo-deformación completa, se debe realizar un análisis estático no lineal.

Figura 15. Grafica Esfuerzo-Deformación del Acrílico.



Fuente: Elaboración propia.

**2.4.2 Enmallado.** Para el enmallado de la geometría, se realizó un refinamiento de malla en la zona de las perforaciones ya que es la zona donde se puede presentar una falla a causa de estas. Por lo cual en esta zona siempre se utilizó un tamaño de malla de 5mm. Para el resto de la geometría se inició con un enmallado de 40mm y se realizó una reducción de la malla con un factor constante de 2 (tabla 3). En cuanto a los elementos usados, se emplearon elementos tetraédricos para facilitar la adaptación de la malla a la geometría del reactor.

<sup>28</sup> Kojima, M., Mitsomwang, P., & Nagasawa, S. (2016). Effect of cutter tip angle on cutting characteristics of acrylic worksheet subjected to punch/die shearing. *AIMS Materials Science*, 3(4), 1728-1747. doi:10.3934/matensci.2016.4.1728

<sup>29</sup> Experiment Findings, M. *Stress and strain analysis on acrylic*

Tabla 3. Tamaño de malla (simulación estructural).

Tamaño de malla (mm)	# de elementos
40,5	35085
20,5	48723
10,5	111513
5	369615

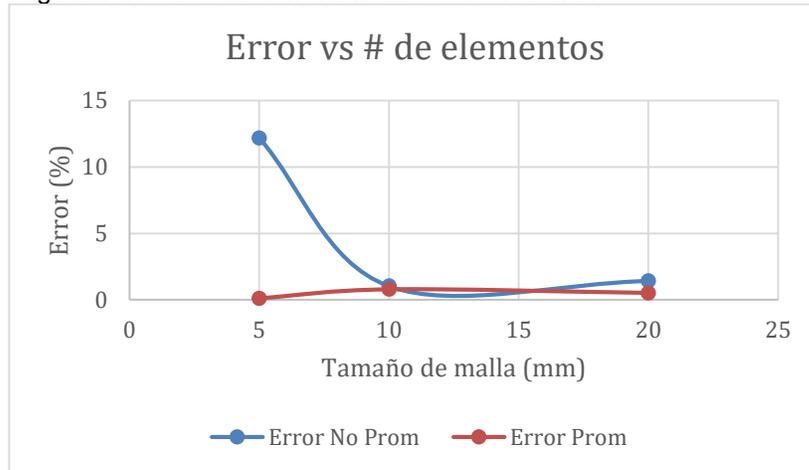
Fuente: Elaboración propia.

**2.4.3 Condiciones de borde.** Las condiciones bajo las cuales se realizó la simulación fue una condición de presión (hidrostática) y una condición de desplazamiento restringido. Para la condición de presión hidrostática se tomó un nivel de fluido de 420 mm, donde se tomó como fluido el agua con una densidad de 1000 kg/m<sup>3</sup>. En cuanto a la restricción de desplazamiento, una condición de translación restringida es la más adecuada, ya que el tanque no se encuentra a presión contra la estructura de soporte y esto deja libre los grados de rotación.

**2.4.4 Convergencia de malla.** Al igual que para las simulaciones de dinámica de fluidos, se usó la ecuación 2 para determinar el error del resultado de las simulaciones y el procedimiento es el mismo. En este caso, como variable de referencia se usó el esfuerzo Von Misses Non-linear Stress promediado y no promediado. Además de ver los esfuerzos en el tanque, la deformación es un dato de interés. En el anexo B4 se encuentra la tabla detallada con todos los valores de las simulaciones. Como se puede ver en la figura 16, las simulaciones con malla de 20 y 10 mm ofrecen buenos resultados. La simulación con un tamaño de 5mm presenta un aumento en el error, por lo cual los datos de dicha malla no son tomados en cuenta.

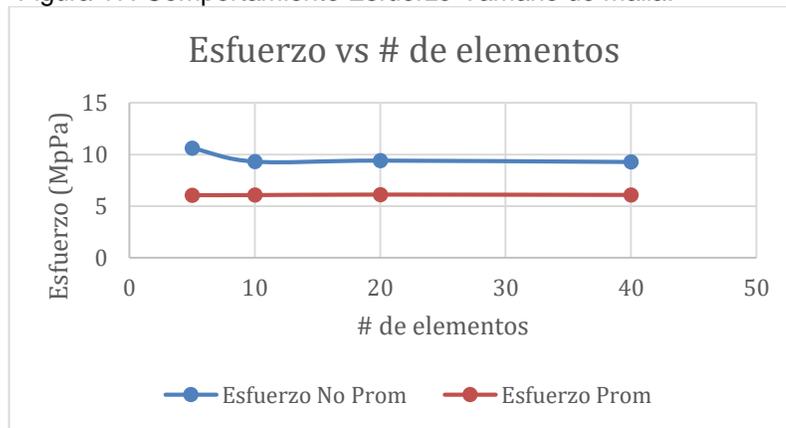
En la figura 17 se puede ver la gráfica de comportamiento de los esfuerzos. Como se puede ver, los esfuerzos son bajos (cerca de 10 MPa), por lo cual el grosor seleccionado para las láminas de acrílico es más que suficiente para las cargas a las que se encuentran sometidas, ofreciendo un factor de seguridad de casi 5. En cuanto a las deformaciones, el valor correspondiente a la malla de 10mm es de 9.21mm. Aunque el valor parece ser elevado, hay que tener en cuenta que se trata de un polímero, el cual puede tolerar altas deformaciones sin superar el límite de fluencia. Además, la relación de altura y longitud de la lámina la hace propensa a pando (figura 18). Esto se solucionó agregando un listón a la estructura de soporte en esta zona, para que se de soporte a la lámina y se evite dicha deformación.

Figura 16. Grafica de error simulación estructural.



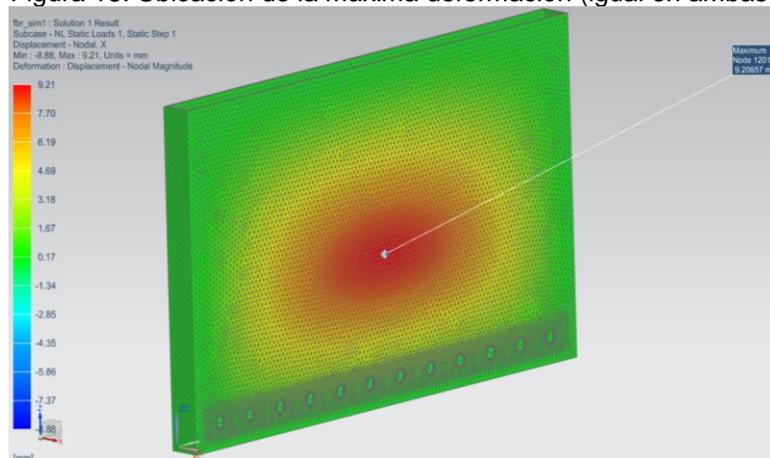
Fuente: Elaboración propia.

Figura 17. Comportamiento Esfuerzo-Tamaño de malla.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 18. Ubicación de la máxima deformación (igual en ambas caras).

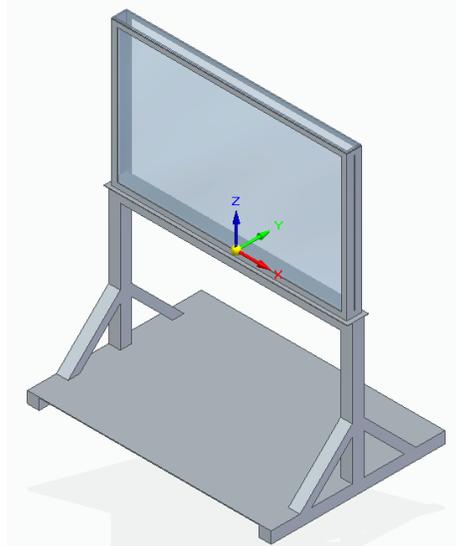


Fuente: Elaboración propia.

### 3. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE

Teniendo como referencia el espacio disponible para ubicar el Fotobioreactor en el laboratorio de la universidad de América y la geometría seleccionada para el tanque, se consideraron dos diseños, los cuales tienen la similitud de incluir un refuerzo a lo largo de todas las uniones del tanque acrílico, con la finalidad de evitar aberturas y derrames. Para la selección de dicha alternativa se realizó la evaluación mediante la metodología de Scoring, en la cual se tomaron como criterios la resistencia a la corrosión, practicidad de ensamble, el espacio ocupado, precio, peso y capacidad de movimiento. La evaluación detallada se encuentra en el anexo C3. La primera alternativa (Figura 19), contempla incorporar todos los dispositivos asociados al proceso, como compresor, sistema de adquisición de datos, y conexiones neumáticas. Este equipo presenta la ventaja de poder desplazarse incluyendo todos los equipos, no obstante, el peso es un aspecto negativo.

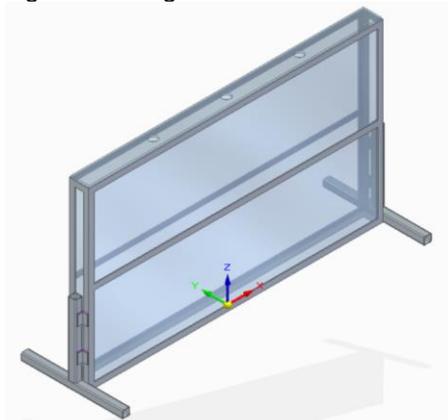
Figura 19. Primera alternativa de diseño estructura.



Fuente: Elaboración propia.

La segunda alternativa (Figura 20), se enfoca en el refuerzo estructural al tanque de acrílico y en el soporte del mismo, siendo este más liviano que la propuesta anterior. En este diseño todos los equipos se encuentran ubicados en forma independiente en lugares cercanos al Fotobioreactor, lo cual dificulta el desplazamiento del equipo parcialmente.

Figura 20. Segunda alternativa de diseño estructura.

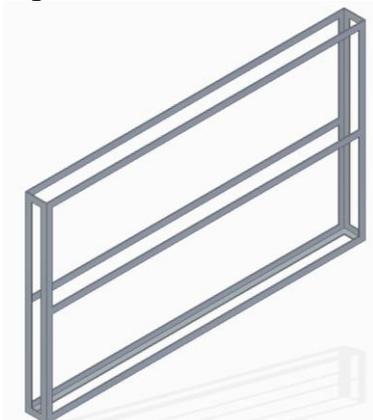


Fuente: Elaboración propia.

Una vez definida la geometría de la estructura se realizó la selección del material, empleando nuevamente la metodología de Scoring cuyo desarrollo se encuentra en el anexo C4, en donde se consideró la resistencia mecánica, la resistencia a los impactos, la resistencia a la corrosión y la dificultad de ensamble. Así se determinó que el mejor material es acero estructural, no obstante, se debe considerar que el peso es mayor en comparación con el aluminio, lo cual puede dificultar la movilidad del equipo.

La base del fotobioreactor (figura 22), está compuesta por perfiles cuadrados en acero con un tamaño de una pulgada. Los datos constructivos fueron tomados del catálogo de la empresa Colmena, en la sección de perfil estructural tubular, la cual se encuentra en el anexo F.

Figura 21. Refuerzo estructural tanque de acrílico.

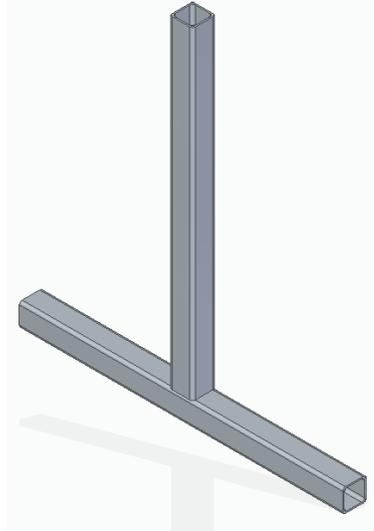


Fuente: Elaboración propia.

El refuerzo del tanque (figura 21), es realizado con ángulos en acero de lados iguales de un tamaño de 19.05mm, los datos constructivos de dicho ángulo son

tomados del catálogo de la empresa Perfiles & Vigas S.A.S, disponible en la página web de la empresa, anexo F.

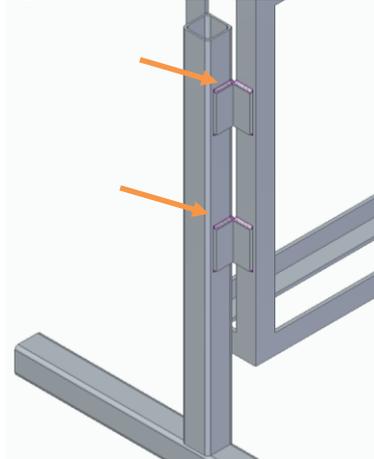
Figura 22. Base Fotobioreactor.



Fuente: Elaboración propia.

Para unir la estructura, se calculó la soldadura para las condiciones de carga del equipo. Para esto fue necesario tener en cuenta el peso que soporta la estructura, como el peso del fluido, el peso de los ángulos y los listones de acero y el acrílico del tanque y del panel de iluminación. Todos estos elementos llegan a sumar casi 50 kg, pero se añadió un 10% de peso extra como factor de seguridad, dejando el peso total en 56kg. En el anexo H se muestra el proceso de cálculo completo de la soldadura. En la figura 23 se muestran las zonas donde se deben aplicar las soldaduras en la estructura.

Figura 23. Ubicación de la soldadura.



Fuente: Elaboración propia.

## 4. DISEÑO DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN

### 4.1 ALTERNATIVAS

Es uno de los procesos más importantes en el diseño del equipo, debido a que de este depende parte de la productividad del cultivo microalgal. Por lo cual, se consideran cinco tipos diferentes de iluminación, los cuales se evaluaron mediante la metodología de Scoring. En la tabla 4 se muestran las alternativas seleccionadas.

Figura 24. Alternativas sistemas de iluminación.



A continuación, se da una breve descripción de las alternativas seleccionadas:

- Bombillas incandescentes: este tipo de bombillas tienen una eficiencia lumínica aproximada de 10-18 %, presentan un alto consumo, alcanzan una intensidad de hasta  $5.1 \text{ W}/\text{m}^2$ , tienen una generación de calor muy elevada, son poco costosas y tienen una vida útil de 750-2000 horas.
- Lámparas halógenas: se presenta calentamiento en un filamento delgado de tungsteno que está rodeado por el gas halógeno, este tipo de bombillas tienen una eficiencia lumínica aproximada de 15-20 % alcanzan una intensidad de hasta  $1.6 \text{ W}/\text{m}^2$ , tienen una generación de calor elevada, son de bajo costo y tienen una vida útil de 3000-4000 horas.

- Lámparas fluorescentes: presentan un bajo índice de calentamiento, tienen una eficiencia lumínica aproximada de 10-18 %, alcanzan una intensidad de hasta  $1.21 \text{ W}/\text{m}^2$ .
- Iluminación LED: tiene la ventaja de brindar una intensidad de hasta  $55.5 \text{ W}/\text{m}^2$  con una generación de calor casi nula, tiene una eficiencia lumínica aproximada de 20-64% y su vida útil es muy amplia, alrededor de 35000-50000 horas.
- Fibra óptica: utiliza corriente de 50 a 100 mA, tiene una vida útil muy extensa y la fuente de iluminación puede ser de bombillas incandescentes o LED.

## 4.2 SELECCIÓN DE COMPONENTES

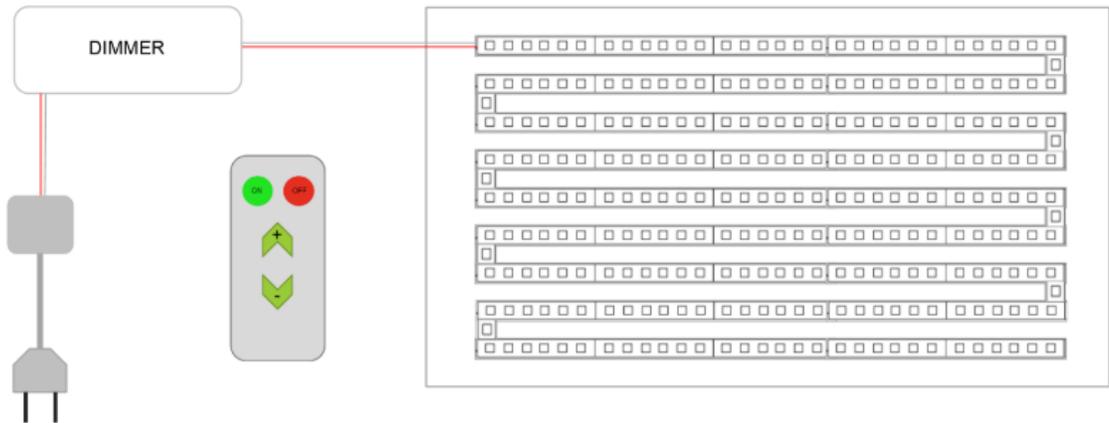
Para la evaluación se consideraron factores como costo, potencia consumida, vida útil, generación de calor, mantenimiento, espacio requerido y eficiencia lumínica. De acuerdo con los resultados del Scoring (anexo C5), la mejor alternativa es la iluminación con Leds. Esto se debe principalmente a la alta eficiencia lumínica de este sistema y la baja generación de calor, muy importante ya que evita la necesidad de realizar un control intensivo de la temperatura del reactor. Además, es una tecnología barata y de bajo consumo. Para facilitar el montaje de la iluminación, se decidió el uso de tiras led, como las mostradas en la figura.

Figura 25. Componentes iluminación.



Para la alimentación del sistema, se requiere una fuente que permita pasar de 110V a 12V. En la figura 25 se puede ver la fuente de iluminación seleccionada. Como se explicó anteriormente, la irradiación del cultivo decrece a medida que este se densifica. Para compensar esto, se incluyó un Dimmer (figura 24), el cual es un dispositivo que permite variar la intensidad del brillo de la cinta led para este caso. Esto permitirá aumentar la intensidad de la cinta led para mejorar la irradiación del cultivo. Para este caso, se seleccionó un atenuador con control remoto para facilitar el manejo de este. En la figura 26, se muestra un esquema de la conexión del sistema de iluminación y la distribución de la cinta led sobre el panel de iluminación elaborado en acrílico, con unas dimensiones de 100x42cm. El sistema consta de una fuente que permite bajar el voltaje de 110V a 12V, voltaje manejado por el atenuador. Entre la cinta de LED rojo y la fuente se sitúa el atenuador, que solo puede manejarse mediante el control remoto.

Figura 26. Distribución y conexión sistema iluminación.



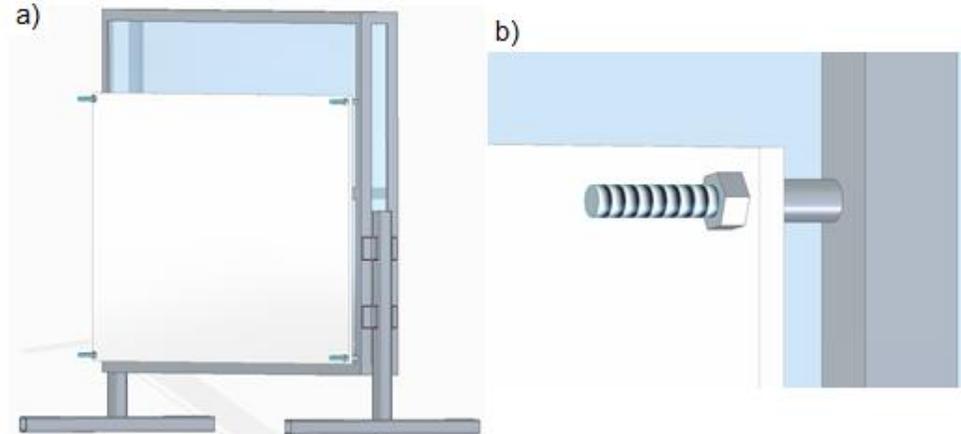
Fuente: Elaboración propia.

### 4.3 UBICACIÓN

El panel de iluminación se encuentra ubicado en un costado del fotobioreactor (figura 27), lo que permitirá generar los ciclos de luz y oscuridad en el interior del reactor. Las dimensiones del panel de iluminación deben coincidir con el volumen del cultivo, por lo cual no cubre la totalidad de la superficie lateral del reactor. El panel se encuentra sujeto a la estructura mediante espárragos roscados soldados a la estructura de soporte. Estos espárragos tienen una longitud de 5 cm de largo, lo que permite una ligera variación en la distancia entre el panel de iluminación y la pared del reactor, mediante el uso de tuercas como se muestra en la figura 26.

Figura 27. Panel de iluminación.

a) Ubicación panel de iluminación; b) Método de sujeción del panel de iluminación.



Fuente: Elaboración propia.

## 5. DISEÑO DEL SISTEMA DE AGITACIÓN

### 5.1 SELECCIÓN DEL METODO DE AGITACION

Previo a la simulación CFD de los reactores, se realizó un proceso de Scoring para las alternativas disponibles. El método más usado en este tipo de reactores es la inyección de aire dado el bajo volumen que se maneja, pero este método de Scoring permite dar un mayor grado de objetividad a la alternativa seleccionada. En el anexo C6 se encuentra la tabla completa mediante la cual se estableció como método de agitación la inyección de aire (figura 28).

Figura 28. Agitación mediante inyección de aire.



Tomado de: <https://sciunt.wordpress.com/category/microalgas/>

Dentro de los parámetros usados para la evaluación se encuentra el costo aproximado de cada sistema, el consumo de energía de cada uno, la complejidad o dificultad en el montaje de cada sistema, lo cual afecta directamente la facilidad del mantenimiento de cada uno y finalmente, el impacto que puede generar sobre el cultivo. Como se ha mencionado anteriormente las microalgas son sensibles a las condiciones de agitación, en especial de los medios mecánicos de agitación. Por ello se debe tener especial cuidado cuando se usa un método mecánico, aunque estos se usan en cultivos de volúmenes mucho mayores, donde la agitación por inyección de aire es incapaz de manejar dicho volumen.

### 5.2 CALCULO DEL COMPRESOR

El caudal de aire es el punto de partida para la selección de los demás componentes del sistema de agitación. El diámetro de las inyecciones de aire se realizó de manera aleatoria, pero buscando una distribución que simplificara el sistema de inyección y generara una distribución uniforme al interior del reactor. Teniendo en cuenta catálogos de racores neumáticos, se usó un diámetro para la inyección de 12mm.

Con los resultados de las simulaciones, se obtuvo una velocidad promedio de 31cm/s en las zonas de inyección. Teniendo la velocidad y el diámetro de la

inyección se determinó mediante la ecuación 7 que el caudal por cada boquilla es de 2.10 L/min, pero al tener 12 boquillas el caudal total es de 25.24 L/min. Con la presión de inyección y la velocidad del aire es posible realizar el cálculo para determinar las características del compresor que se requiere.

Ecuación 7. Caudal

$$Q = \text{Velocidad} * \text{Area}$$

Las ecuaciones 9 y 10 determinan la potencia que debe tener el compresor y el motor eléctrico que suministra potencia a este. Hay que tener en cuenta que para el cálculo la presión atmosférica es de 560 mmHg en Bogotá y para la eficiencia del motor se puede tomar un valor del 80%. En el anexo E se puede ver el proceso de cálculo más detallado.

Ecuación 8. Relación de compresión

$$RC = \frac{\text{Presion de inyeccion}}{\text{Presion Atmosferica}}$$

Ecuación 9. Potencia del Compresor

$$Pc = 8.01 * (Q * 60) * (RC^{0.286} - 1)$$

Ecuación 10. Potencia del Motor.

$$Pm = \frac{Pc}{\text{Eficiencia motor}}$$

Los resultados muestran que, debido a la baja presión de inyección, el compresor requerido es de baja potencia pero que debe poder trabajar largas jornadas de trabajo dada la duración del proceso de cultivo. Ya que la mayoría de compresores comerciales suele usar un motor de pistones el flujo de aire que se obtiene es pulsante, por lo cual debe haber un acumulador que permita obtener un flujo estable. En la tabla 3 se resumen los parámetros para la selección del compresor.

Tabla 4. Parámetros de selección del compresor

<b>Parámetros del compresor</b>	
Caudal	25.3 L/min
Presión	74760.5 Pa
Potencia	4.33 W
Acumulador	Si

Fuente: Elaboración propia.

### 5.3 SELECCION DE COMPRESOR

Teniendo en cuenta los parámetros establecidos para el compresor, buscando en el mercado se escogieron 3 alternativas para el compresor.

La primera alternativa es un compresor para aerografía, marca Ranger, que puede entregar un caudal de hasta 50 L/min. La potencia de este compresor es de 1/3 HP y permite trabajar presiones de hasta 3 Bar. Este compresor es una alternativa viable, pero no tiene un acumulador, haciendo necesario agregar un tanque que debe ser calculado y diseñado por aparte. Una desventaja radica en que estos compresores suelen diseñarse para tiempos de trabajo relativamente cortos.

La segunda alternativa es un compresor de tipo industrial, marca DeWalt. Este compresor tiene una potencia de 1.5 HP, entregando un caudal de hasta 73 L/min y trabajando con presiones de hasta 10 Bar. Al ser un compresor para industria, este compresor puede tolerar largas jornadas de trabajo continuo sin problema alguno. Además, posee un acumulador de 25 Lts y conexiones rápidas de ¼". La principal desventaja de esta alternativa es el costo que posee.

La tercera alternativa es una bomba tipo pecera. Estas bombas son de trabajo continuo por lo cual son ideales para este tipo de tareas, pero se encuentran muy limitadas en cuando a las demás características de trabajo. Aunque cumplen con la potencia y el caudal requerido (usando una bomba por cada inyección), el rango de trabajo del caudal y presión que manejan las condicionan como alternativas viables.

Usando la metodología de Scoring, además de considerar como ítems de evaluación las condiciones de selección, se evaluó el valor agregado que ofrecía cada alternativa. En el anexo C7 se encuentra la tabla completa y los resultados del Scoring. Como es de esperarse la mejor alternativa, a pesar del costo es el compresor DeWalt y dada la importancia de la agitación en el proceso de cultivo, contar con un equipo sólido y confiable es muy importante, ya que además permite flexibilidad de trabajo en cuanto a las condiciones de inyección.

Figura 29. Alternativas para el compresor.<sup>30 31 32</sup>



<sup>30</sup> MERCADOLIBRE.Pintar bronceado mini compresor de aire V-888 ranger 1/3 hp. Retrieved from [https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-466561197-pintar-bronceado-mini-compresor-de-aire-v-888-ranger-13-hp-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-466561197-pintar-bronceado-mini-compresor-de-aire-v-888-ranger-13-hp-_JM)

<sup>31</sup> MERCADOLIBRE.Compresor de aire 150 psi 6 galones 1.5 hp 2.6 cfm dewalt. Retrieved from [https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-466447463-compresor-de-aire-150-psi-6-galones-15-hp-26-cfm-dewalt-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-466447463-compresor-de-aire-150-psi-6-galones-15-hp-26-cfm-dewalt-_JM)

<sup>32</sup> MERCADOLIBRE.Ajustable bomba aire aireador acuario oxigenador silencioso. Retrieved from [https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-461446753-ajustable-bomba-aire-aireador-acuario-oxigenador-silencioso-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-461446753-ajustable-bomba-aire-aireador-acuario-oxigenador-silencioso-_JM)

## 5.4 ELEMENTOS DE CONEXIÓN

Teniendo el compresor, hay que seleccionar los racores, empaques, mangueras y demás elementos a usar para componer el sistema de inyección. Para la selección de todos estos componentes se usaron los catálogos de la empresa FESTO.

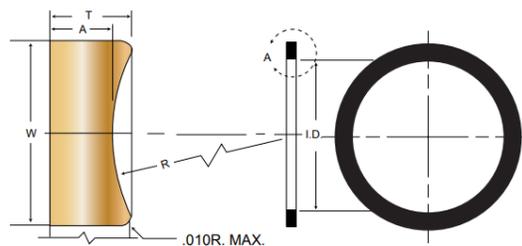
Para la inyección en el tanque se seleccionaron racores de acople rápido pasa muros, ya que este tipo de racores evita la necesidad de agregar grosor a la zona de la inyección para realizar la rosca necesaria para un racor rápido de roscado estándar (figura 30). Este racor requiere el uso de empaques con la finalidad de que no haya fugas de líquido entre el racor y la pared del reactor. Debido a que se trabaja con medios de cultivo con presencia de químicos, es necesario que los empaques sean inertes y no afecten el cultivo. Por lo cual el material recomendado para esto es el FKM<sup>33</sup> <sup>34</sup> Shore A75, dada su resistencia al oxígeno y demás compuestos químicos. Dada la forma del acople entre el racor y la pared del tanque, se usó un empaque de Back-up Ring, como se muestra en la figura 31.

Figura 30. Racor pasamuro y racor rapido estandar.<sup>35</sup>



Figura 31. Geometría del empaque.<sup>36</sup>

### BACK-UP RING



Tomado de <https://www.oring-sellos.com/materiales/>

<sup>33</sup> Hexafluoropropylenevinylidene fluoride Copolymers ( FKM ). Caucho de alto rendimiento con contenido de fluor entre el 66 y el 70%.

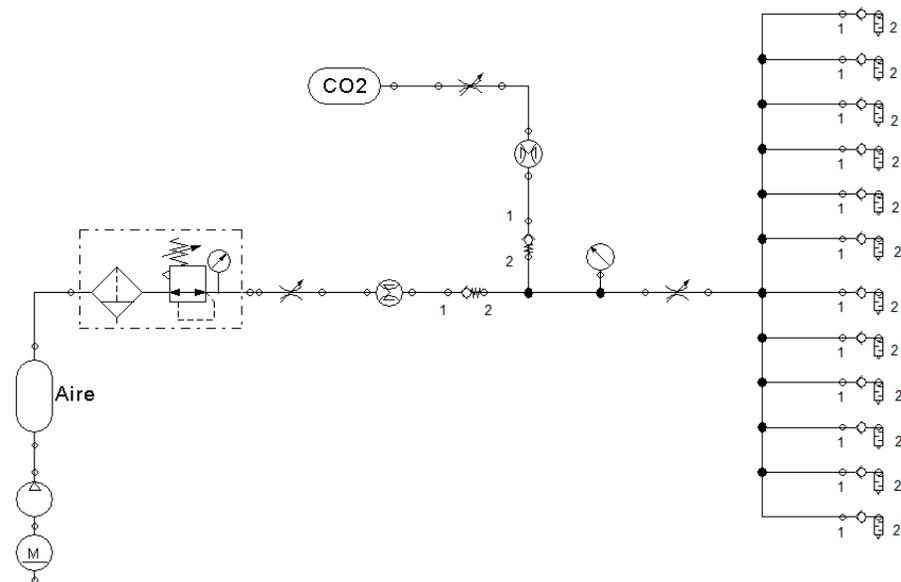
<sup>34</sup> Oring y Sellos. (). MATERIALES – oring y sellos. Retrieved from <https://www.oring-sellos.com/materiales/>

<sup>35</sup>FESTO.Racores rapidos roscados. Retrieved from [https://www.festo.com/cat/es-co\\_co/products\\_\\_01198](https://www.festo.com/cat/es-co_co/products__01198)

<sup>36</sup> ORing%Sellos, S. A. S. (). Back up ring – oring y sellos. Retrieved from <https://www.oring-sellos.com/producto/back-up-ring/>

En cuanto al tubo flexible o manguera, los requerimientos no son elevados ya que al tenerse presiones de trabajo tan bajas el tubo flexible no tiene que soportar presiones muy elevadas, por lo cual casi cualquier tubo flexible es suficiente. Teniendo en cuenta la compatibilidad con los racores seleccionados, se seleccionó un tubo flexible elaborado en PAN y compatible con la serie QS, a la que pertenecen los racores. Para evitar elaborar una flauta externa, se hizo la conexión entre el compresor y el reactor únicamente con tubo flexible y racores rápido en T (figura 33), permitiendo un mantenimiento más sencillo y ocupar un menor espacio. En la figura 31 se muestra un esquema general del sistema neumático. Dado que la salida del compresor es de 1/4" y el tubo flexible para el sistema es de 12mm, se hizo uso de un racor rápido de serie estándar reductor, que permite pasar del 1/4" a los 12 mm, mostrado en la figura 33. En el anexo F se pueden ver las páginas de los catálogos para la información detallada sobre cada selección.

Figura 32. Esquema neumático.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 33. Racor en T y racor de reducción.<sup>37</sup>



<sup>37</sup> FESTO.Racores rápidos roscados. Retrieved from [https://www.festo.com/cat/es-co\\_co/products\\_\\_01198](https://www.festo.com/cat/es-co_co/products__01198)

## 6. SELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN

Dado que para este trabajo solo está planteado la selección de la instrumentación para el proceso, la programación no se tratará en este proyecto. Con el fin de permitir la generación de una bitácora del proceso, una unidad de adquisición de datos es necesaria. Teniendo en cuenta los costos de un sistema de instrumentación, se seleccionó un sistema basado en Arduino, cuyas principales ventajas se encuentran en su costo y el costo de todos los componentes que se pueden conectar a este dispositivo. Por tal razón, todos los sensores seleccionados son compatibles con este sistema. En el anexo J se encuentra una lista con los costos aproximados de los elementos a continuación listados.

Para poder seleccionar los elementos de la instrumentación, es necesario tener en cuenta cuales son las variables de proceso que se van a vigilar<sup>38</sup>. Para este proceso, hay 4 variables principales de interés: temperatura, pH, concentración de CO<sub>2</sub>, intensidad lumínica y velocidad. La temperatura a pesar de no ser un factor crítico al ser un reactor para interiores, se debe registrar durante el proceso y, además se incluirá un calentador para peceras en caso de necesitar corregir la temperatura del cultivo. Para la selección del calentador, se tiene que por cada litro de agua que se tenga, se requiere una potencia de 1W. Por lo cual, para este caso se requiere un calentador de 25W para el volumen de 21L del reactor. El sensor de temperatura escogido es de tipo sonda, para permitir sumergir el sensor como se muestra en la figura 34.

Figura 34. Calefactor y sonda de temperatura.<sup>39</sup>



En cuanto al pH, también se seleccionó una sonda sumergible (figura 35), pero a diferencia de la sonda de temperatura no se dejará fija. Esto permitirá conocer el pH en distintos puntos del reactor, mediante perforaciones guía en la tapa del reactor. Dado que el pH es un reflejo de la concentración de CO<sub>2</sub>, no se hará control directo

<sup>38</sup> Dormido, R., Sánchez, J., Duro, N., Dormido-Canto, S., Guinaldo, M., & Dormido, S. (2014). An interactive tool for outdoor computer controlled cultivation of microalgae in a tubular photobioreactor system. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 14(3), 4466-4483. doi:10.3390/s140304466

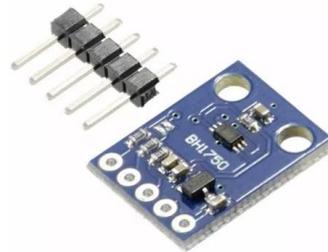
<sup>39</sup> MERCADOLIBRE. Sonda con sensor de temperatura Ds18b20 sumergible arduino. Retrieved from [https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-469165895-sonda-con-sensor-de-temperatura-ds18b20-sumergible-arduino-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-469165895-sonda-con-sensor-de-temperatura-ds18b20-sumergible-arduino-_JM)

de la concentración de oxígeno disuelto en el cultivo. Mediante un rotámetro se controlará la concentración de CO<sub>2</sub> y con un segundo rotámetro y el área de flujo del aire de inyección se podrá calcular la velocidad del flujo (figura 32). Se plantean dos alternativas: la primera es un rotámetro proporcionador, que permite medir el flujo de dos corrientes en un solo instrumento (referencia 044-40G); y la segunda que son dos rotámetros sencillos por separado: uno para la corriente de CO<sub>2</sub> y otro para la corriente de aire (referencias 013-88-ST y 064-63-ST respectivamente). En el anexo I se encuentra el detalle de los rotámetros seleccionados.

Figura 35. Módulo de pH.<sup>40</sup>



Figura 36. Sensor de intensidad lumínica.<sup>41</sup>



Debido a que se propone la implementación de un sistema lumínico adaptable, el uso de sensores de luz permitirá automatizar el proceso de iluminación más adelante (figura 36)<sup>42</sup>. Dado que un sensor no es suficiente para abarcar toda el área del reactor y al ser un sensor de bajo coste, la precisión que se tiene de la medida no es la deseada. Por lo cual se ubicaron varios sensores de luz, que permitan abarcar el área de iluminación del reactor y permitan tener una lectura más confiable sobre la intensidad lumínica, como se muestra en la figura 37.

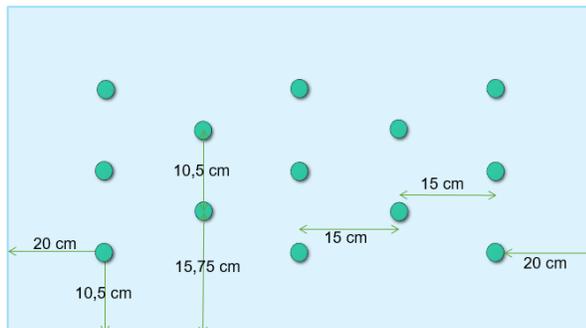
---

<sup>40</sup> MERCADOLIBRE. Sensor detector ph modulo + sonda electrodo ph bnc arduino &nbsp; Retrieved from [https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-455312651-sensor-detector-ph-modulo-sonda-electrodo-ph-bnc-arduino-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-455312651-sensor-detector-ph-modulo-sonda-electrodo-ph-bnc-arduino-_JM)

<sup>41</sup> MERCADOLIBRE. Sensor de luz gy 302 - Bh1750 arduino -sensor de iluminacion -. Retrieved from [https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-453230741-sensor-de-luz-gy-302-bh1750-arduino-sensor-de-iluminacion-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-453230741-sensor-de-luz-gy-302-bh1750-arduino-sensor-de-iluminacion-_JM)

<sup>42</sup> Kandilian, R., Tsao, T., & Pilon, L. (2014). Control of incident irradiance on a batch operated flat-plate photobioreactor. *Chemical Engineering Science*, 119, 99-108. doi:10.1016/j.ces.2014.07.056

Figura 37. Disposición sensores de luz.



Fuente: Elaboración propia.

## 7. CONCLUSIONES

- Gracias al uso de simulaciones CFD, es posible corregir errores de diseño en la geometría del reactor. Con esto, se evitó la generación de una zona muerta en la zona inferior del reactor al reemplazar la flauta de inyección (velocidades de 0 mm/s), por inyecciones con racores laterales (velocidades de hasta 5 mm/s).
- Los datos proporcionados por las simulaciones CFD permiten realizar una mejor selección del compresor para el sistema de agitación al conocer con mayor certeza el caudal y la presión requeridas.
- Debido al tipo de uso que se le dará al equipo, la estructura cumple una mayormente una función de estabilidad que de resistir cargas. Por lo cual, una estructura compacta es adecuada ya que permite fácil movilidad y ocupa poco espacio. Aunque es necesario que los equipos complementarios se encuentren próximos al tanque.
- La incorporación de sensores de luz permitirá tener un mejor aprovechamiento de la luz en el reactor, al permitir graduar la intensidad de esta teniendo en cuenta la dificultad en la penetración de la luz a medida que el cultivo de microalgas crece.
- La inclusión de sensores de temperatura, luz y pH permitirá monitorear las principales variables del proceso, permitiendo que este se lleva a cabo con una menor variabilidad de estas.

## 8. RECOMENDACIONES

- Para mejorar el diseño del equipo se recomienda considerar fenómenos propios del proceso de cultivo como la transferencia de masa, transferencia de calor, etc. Esto con el fin de acercar el modelo de las simulaciones al comportamiento real del proceso.
- Realizar la automatización del proceso a partir del registro de datos propuesto en el presente trabajo.
- Con el fin de mejorar la flexibilidad del equipo, se propone el uso de cintas de LED RGB de modo que se pueda variar el color de estas. Esto evitara reemplazar la cinta LED cada vez que se desee cambiar el color de la iluminación.
- Dado que las presiones de trabajo obtenidas en la simulación son bajas, se recomienda trabajar el compresor a una presión de trabajo constante (3 Bar por ejemplo), y realizar el control de la velocidad del aire mediante las válvulas de estrangulamiento. Esto gracias a la ausencia de relación entre la presión y la velocidad de un flujo en las ecuaciones de Navier-Stokes.

## BIBLIOGRAFIA

Abordar situaciones de incertidumbre o con pocos niveles de, & información.Ponderación lineal (scoring)

ANJOS, M., FERNANDES, B. D., VICENTE, A. A., TEIXEIRA, J. A., & DRAGONE, G. (2013). Optimization of CO<sub>2</sub> bio-mitigation by *Chlorella vulgaris*. *Bioresource Technology*, 139, 149-154. doi:10.1016/j.biortech.2013.04.032

ATTA, M., IDRIS, A., BUKHARI, A., & WAHIDIN, S. (2013). Intensity of blue LED light: A potential stimulus for biomass and lipid content in fresh water microalgae *Chlorella vulgaris*. *Bioresource Technology*, 148, 373-378. doi:10.1016/j.biortech.2013.08.162

BERBEROGLU, H., PILON, L., & MELIS, A. (2008). Radiation characteristics of *Chlamydomonas reinhardtii* CC125 and its truncated chlorophyll antenna transformants *tla1*, *tlaX* and *tla1-CW*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(22), 6467-6483. doi:10.1016/j.ijhydene.2008.07.071

CHEN, Z., JIANG, Z., ZHANG, X., & ZHANG, J. (2016). Numerical and experimental study on the CO<sub>2</sub> gas-liquid mass transfer in flat-plate airlift photobioreactor with different baffles. *Biochemical Engineering Journal*, 106, 129-138. doi:10.1016/j.bej.2015.11.011

COMPLICATIONS.Cultivation: Design considerations

Diego Córdoba.Las ecuaciones de Navier-Stokes I

DORMIDO, R., SÁNCHEZ, J., DURO, N., DORMIDO-CANTO, S., GUINALDO, M., & DORMIDO, S. (2014). An interactive tool for outdoor computer controlled cultivation of microalgae in a tubular photobioreactor system. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 14(3), 4466-4483. doi:10.3390/s140304466

Experiment Findings, M.Stress and strain analysis on acrylic

FRANZISKA HEMPEL, ANDREW S BOZARTH, NICOLE LINDENKAMP, ANDREAS KLINGL, STEFAN ZAUNER, UWE LINNE, . . . UWE G MAIER. (2011). Microalgae as bioreactors for bioplastic production. *Microbial Cell Factories*, 10(1), 81. doi:10.1186/1475-2859-10-81

GREGORY T BENZ. (2008). Piloting bioreactors for agitation scale-up. *Chemical Engineering Progress*, 104(2), 32. Retrieved from <https://search.proquest.com/docview/221529384>

GUO, X., YAO, L., & HUANG, Q. (2015). Aeration and mass transfer optimization in a rectangular airlift loop photobioreactor for the production of microalgae. *Bioresource Technology*, 190, 189-195. doi:10.1016/j.biortech.2015.04.077

GUPTA, P., LEE, S., & CHOI, H. (2015). A mini review: Photobioreactors for large scale algal cultivation. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 31(9), 1409-1417. doi:10.1007/s11274-015-1892-4

HUANG, J., FENG, F., WAN, M., YING, J., LI, W., LI, Y., . . . SHEN, G. (2015). Improving performance of flat-plate photobioreactors by installation of novel internal mixers optimized with computational fluid dynamics. *Bioresource Technology*, 182, 151-159. doi:10.1016/j.biortech.2015.01.067

HUANG, J., YING, J., FAN, F., YANG, Q., WANG, J., & LI, Y. (2016). Development of a novel multi-column airlift photobioreactor with easy scalability by means of computational fluid dynamics simulations and experiments. *Bioresource Technology*, 222, 399-407. doi:10.1016/j.biortech.2016.09.109

INAIPIIL LEAL, M. I. Análisis fluido dinámico de un flujo de burbujas mediante cfd. Analisis De La Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas,

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486- 6166. Bogotá D.C.: El instituto, 2018. 153 p. ISBN 978-958-8585-67-3.

ISSARAPAYUP, K., POWTONGSOOK, S., & PAVASANT, P. (2011). Economical review of haematococcus pluvialis culture in flat-panel airlift photobioreactors. *Aquacultural Engineering*, 44(3), 65-71. doi:10.1016/j.aquaeng.2011.03.002

JHONNATHAN CAMILO TOVAR SALAMANCA, & JENNY PAOLA RUÍZ DÍAZ. Propuesta de escalamiento de un fotobioreactor para la microalga chlorella vulgaris a nivel piloto

JORGE ADRIÁN PIEDRAHITA HERNÁNDEZ, & STEVEN URBANO MONTES. Diseño del sistema de alimentación y control de temperatura en un fotobiorreactor para la producción de biomasa y ácidos grasos a partir del cultivo de la microalga chlorella vulgaris. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bogota D.C.: Fundacion Universidad de America. Facultad de Inenierias.

K.H.AL-MASHHADANI, M., J.WILKINSON, S., & B.ZIMMERMAN, W. Airlift bioreactor for biological applications with microbubblemediated transport processes. *Chemical Engineering Science*,

KANDILIAN, R., TSAO, T., & PILON, L. (2014). Control of incident irradiance on a batch operated flat-plate photobioreactor. *Chemical Engineering Science*, 119, 99-108. doi:10.1016/j.ces.2014.07.056

KLAUBER, J. (2007). *Schwerpunkt*. Stuttgart: Schattauer.

KOJIMA, M., MITSOMWANG, P., & NAGASAWA, S. (2016). Effect of cutter tip angle on cutting characteristics of acrylic worksheet subjected to punch/die shearing. *AIMS Materials Science*, 3(4), 1728-1747. doi:10.3934/matricsci.2016.4.1728

LEE, H., & AHN, D. (2015). Manufacture of a large-sized flat panel airlift photobioreactor (FPA PBR) case with characteristic shapes using a thermoforming process. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(12), 5099-5105. doi:10.1007/s12206-015-1107-9

LESTINSKY, P., VAYRYNEN, P., VECER, M., & WICHTERLE, K. (2012). Hydrodynamics of airlift reactor with internal circulation loop: Experiment vs. CFD simulation. *Procedia Engineering*, 42, 892-907. doi:10.1016/j.proeng.2012.07.482

LI, J., STAMATO, M., VELLIIOU, E., JEFFRYES, C., & AGATHOS, S. N. (2015). Design and characterization of a scalable airlift flat panel photobioreactor for microalgae cultivation. *Journal of Applied Phycology*, 27(1), 75-86. doi:10.1007/s10811-014-0335-1

MALDONADO, C. E. ¿Qué dice la ecuación Navier–Stokes? Retrieved from <https://www.desdeabajo.info/ciencia-y-tecnologia/item/25725-que-dice-la-ecuacion-navier-stokes.html>

MORA, X. (2017, -07-07T14:08:58+00:00). Las ecuaciones de navier-stokes. Retrieved from <https://metode.es/revistas-metode/monograficos/equacions-navier-stokes.html>

NADERI, G., ZNAD, H., & TADE, M. O. (2017). Investigating and modelling of light intensity distribution inside algal photobioreactor. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 122, 530-537. doi:10.1016/j.cep.2017.04.014

OLMO-VELÁZQUEZ, A., PIEDRA-DÍAZ, M., ROJAS-MAZAIRA, L., RODRÍGUEZ-MADRIGAL, M., & MARTÍNEZ-MARTÍN, E. (2015). Estudio y modelación del flujo bifásico líquido-gas para bajos valores de reynolds. *Ingeniería Mecánica*, 18(1), 1-11. Retrieved from [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-59442015000100001&lng=en&tlng=en](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59442015000100001&lng=en&tlng=en)

QINGSHAN HUANG, FUHUA JIANG, LIANZHOU WANG, & CHAO YANG. (2017). Design of photobioreactors for mass cultivation of photosynthetic organisms. *Engineering*, 3(3), 318-329. doi:10.1016/J.ENG.2017.03.020

REYNA-VELARDE, R., CRISTIANI-URBINA, E., HERNÁNDEZ-MELCHOR, D. J., THALASSO, F., & CAÑIZARES-VILLANUEVA, R. O. (2010). Hydrodynamic and mass transfer characterization of a flat-panel airlift photobioreactor with high light path. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 49(1), 97-103. doi:10.1016/j.cep.2009.11.014

RUBIO FERNÁNDEZ, D., SIERRA HERRERA, J. A., RUIZ FONSECA, S., & SANDOVAL HERRERA, J. A. (2014). Diseño de un fotobiorreactor airlift a escala banco. *Elementos*, 4(4) doi:10.15765/e.v4i4.520

SIERRA, E., ACIÉN, F. G., FERNÁNDEZ, J. M., GARCÍA, J. L., GONZÁLEZ, C., & MOLINA, E. (2008). Characterization of a flat plate photobioreactor for the production of microalgae. *Chemical Engineering Journal*, 138(1), 136-147. doi:10.1016/j.cej.2007.06.004

SKJÅNES, K., ANDERSEN, U., HEIDORN, T., & BORGVANG, S. (2016). Design and construction of a photobioreactor for hydrogen production, including status in the field. *Journal of Applied Phycology*, 28(4), 2205-2223. doi:10.1007/s10811-016-0789-4

SLEGGERS, P. M., WIJFFELS, R. H., VAN STRATEN, G., & VAN BOXTEL, A. J. B. (2011). Design scenarios for flat panel photobioreactors. *Applied Energy*, 88(10), 3342-3353. doi:10.1016/j.apenergy.2010.12.037

TAMBURIC, B., ZEMICHAEL, F. W., CRUDGE, P., MAITLAND, G. C., & HELLGARDT, K. (2011). Design of a novel flat-plate photobioreactor system for green algal hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(11), 6578-6591. doi:10.1016/j.ijhydene.2011.02.091

ASOCIACION COLOMBIANA DE INGENIERIA SISMICA. Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo-Resistente, NSR-10. Bogotá.

WANG, S., STILES, A. R., GUO, C., & LIU, C. (2014). Microalgae cultivation in photobioreactors: An overview of light characteristics. *Engineering in Life Sciences*, 14(6), 550-559. doi:10.1002/elsc.201300170

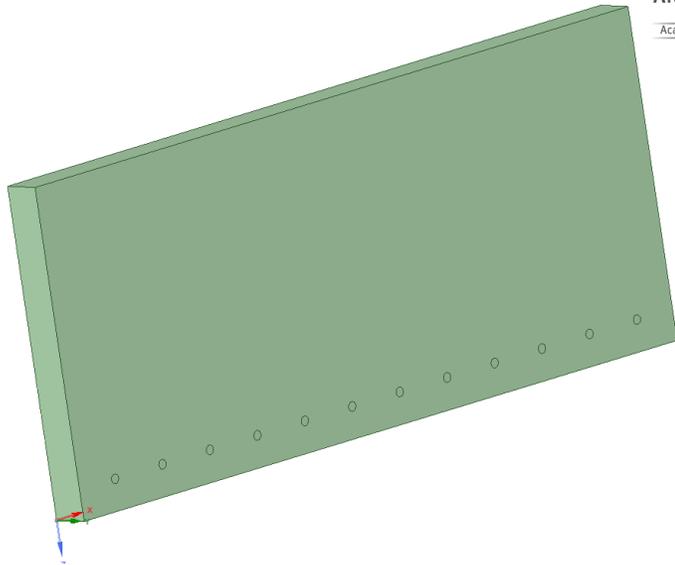
YANG, W., YANG, Z., CHENG, J., ZHOU, J., & CEN, K. (2016). Developing a water-circulating column photobioreactor for microalgal growth with low energy consumption. *Bioresource Technology*, 221, 492-497. doi:10.1016/j.biortech.2016.09.071

YANG, Z., CHENG, J., XU, X., ZHOU, J., & CEN, K. (2016). Enhanced solution velocity between dark and light areas with horizontal tubes and triangular prism baffles to improve microalgal growth in a flat-panel photo-bioreactor. *Bioresource Technology*, 211, 519-526. doi:10.1016/j.biortech.2016.03.145

## **ANEXOS**

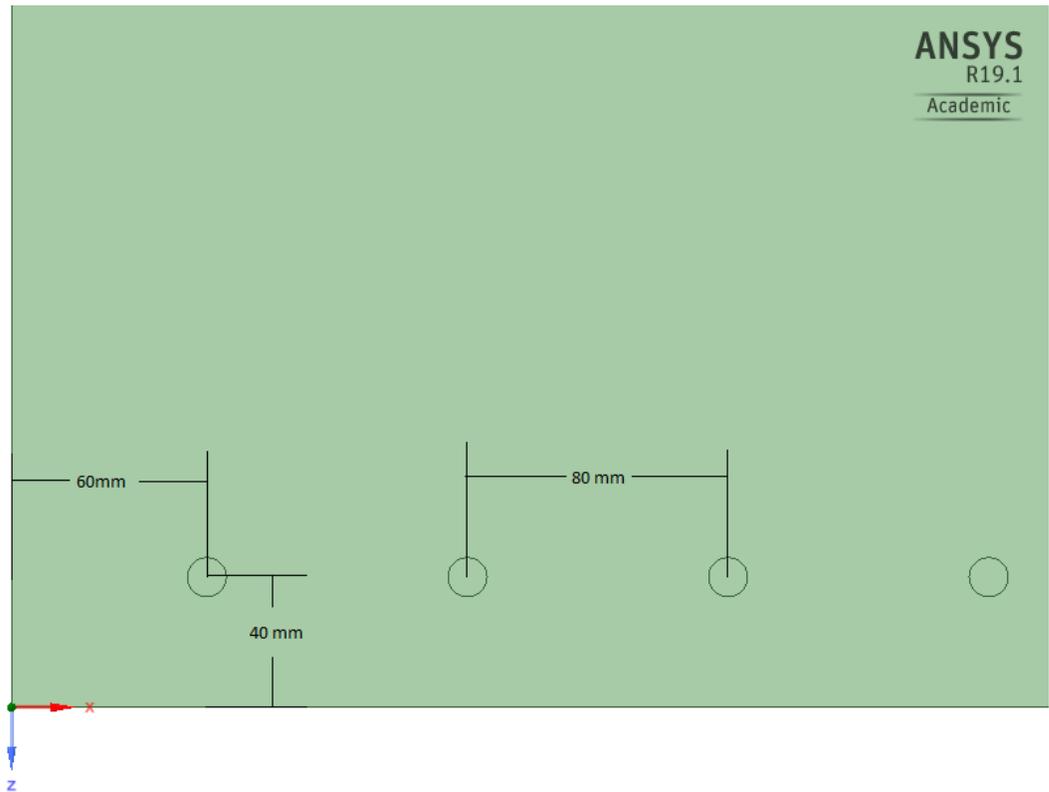
## ANEXO A. DOMINIOS DE FLUIDO PARA LAS SIMULACIONES

### Fotobioreactor Panel Plano.



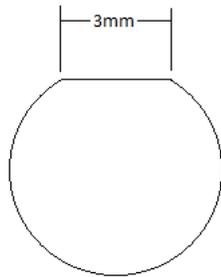
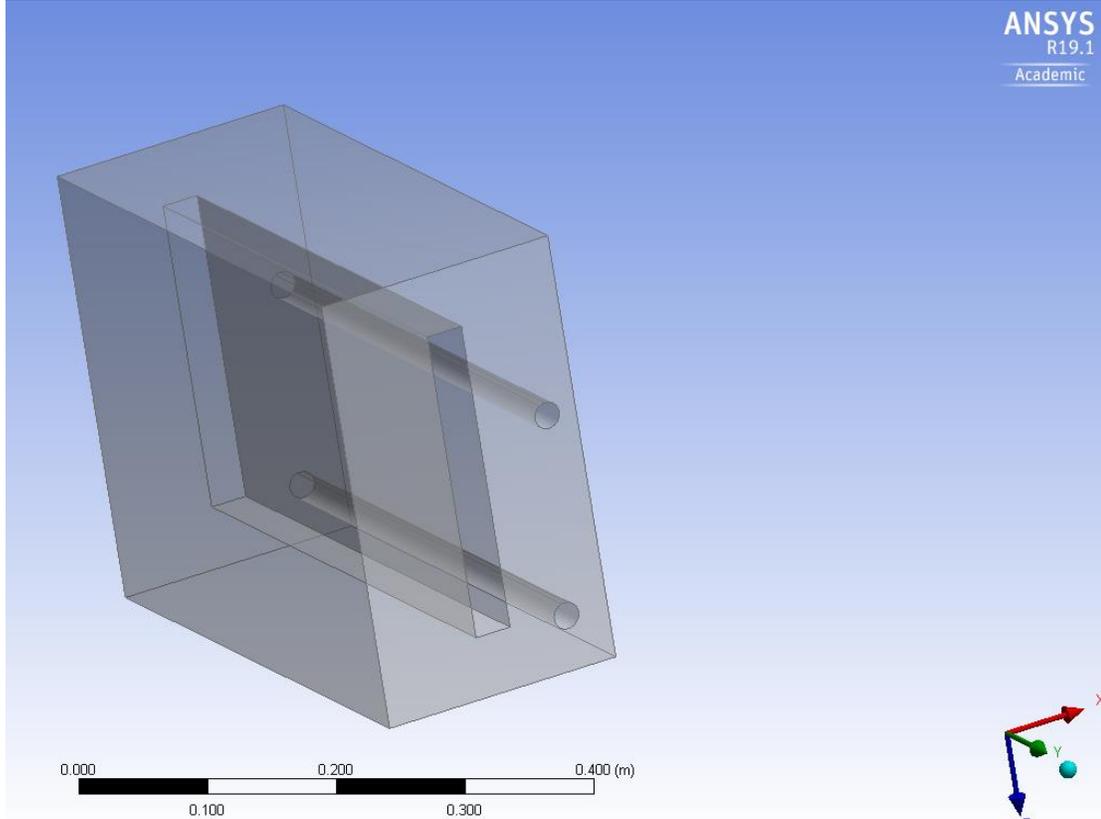
ANSYS  
R19.1  
Academic

Dominio de fluido para el reactor Panel Plano. Aunque las dimensiones del reactor son 50x600x1000, el nivel de fluido es de 420mm. El reactor cuenta con 12 inyecciones, cada una con un diámetro de 12mm. Entre ellas el espacio entre centros es de 80 mm y a continuación se muestran las dimensiones de ubicación de las perforaciones en el reactor.



ANSYS  
R19.1  
Academic

## Fotobioreactor Airlift.

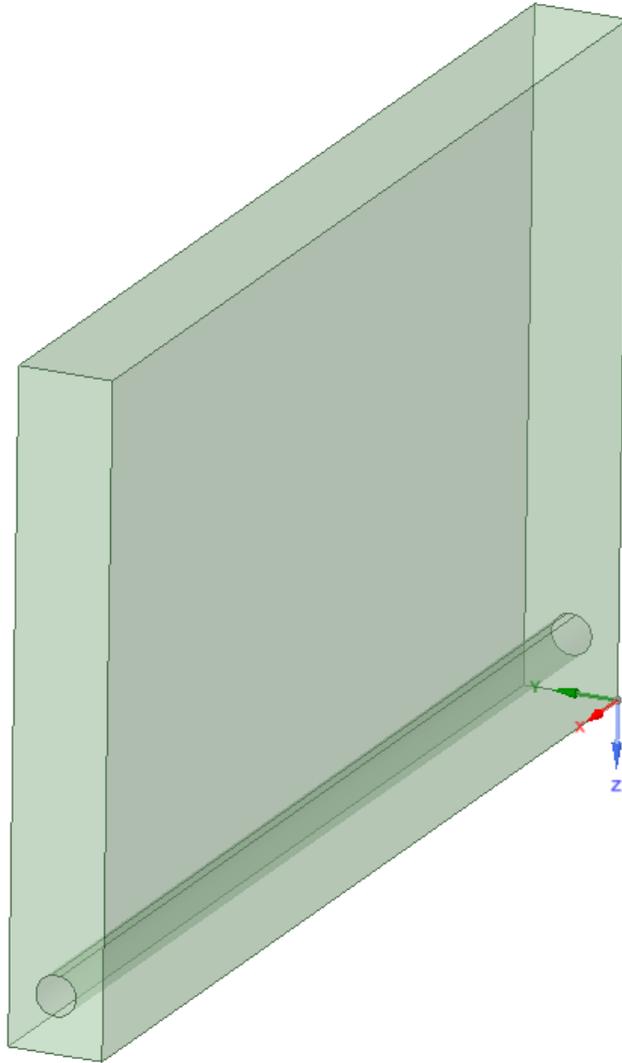


Geometría de cada flauta de inyección.

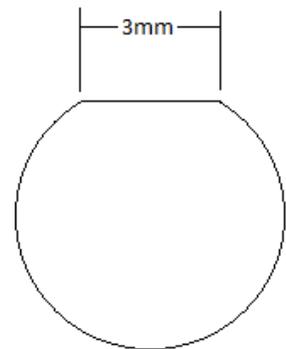
Dominio del fluido para el reactor Airlift de dimensiones 200x450x600, donde se tienen 2 inyecciones de aire. Cada flauta de inyección tiene 1" de diámetro y la superficie para la inyección se muestra a continuación. Aunque la altura del reactor es de 450mm, el nivel de fluido es de 350mm.

## Fotobioreactor Panel Plano Volumen dividido.

ANSYS  
R19.1  
Academic



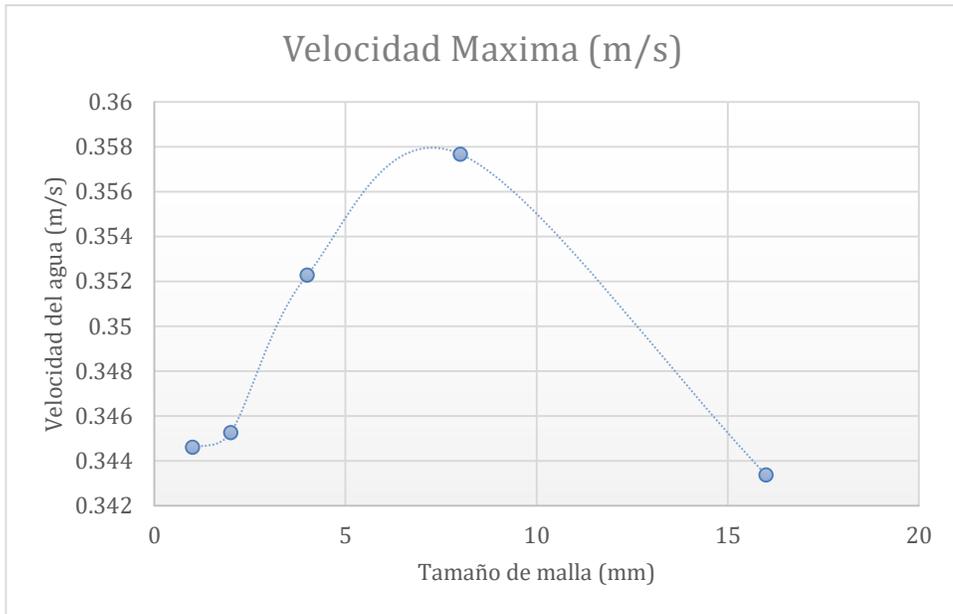
Dominio para el reactor Panel Plano Pequeño, usa una flauta como medio de inyección con una geometría igual a la del reactor Airlift. Este reactor tiene un volumen de 10 L y el nivel de fluido se sitúa en 350mm y la altura del reactor es de 400mm.



## ANEXO B. SIMULACIONES

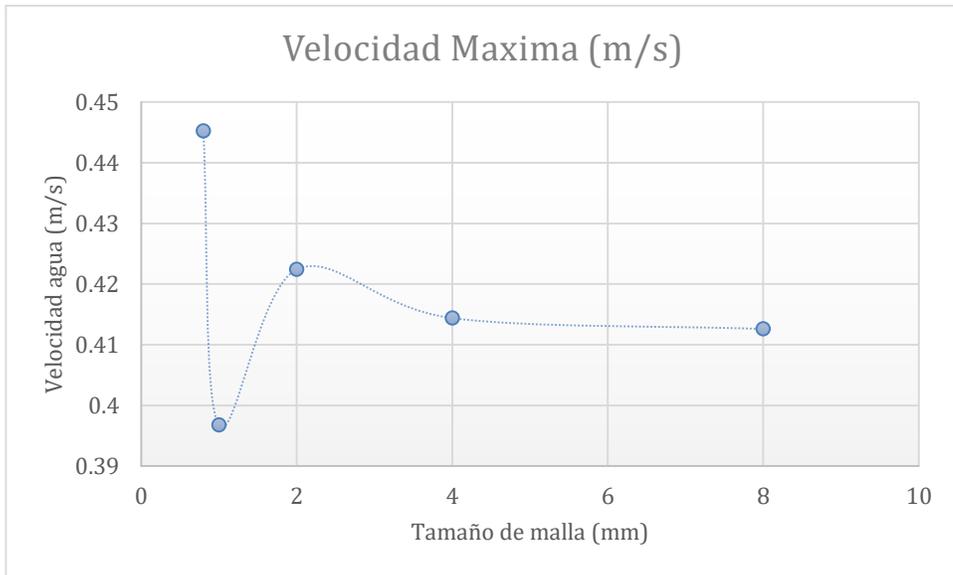
**Tabla de Convergencia reactor Panel Plano.**

Tamaño de malla (mm)	Velocidad Maxima (m/s)	Error %
16	0.3433712	N.A.
8	0.35767394	3.99882083
4	0.3522764	1.53218893
2	0.3452548	2.03374435
1	0.3446006	0.18984297



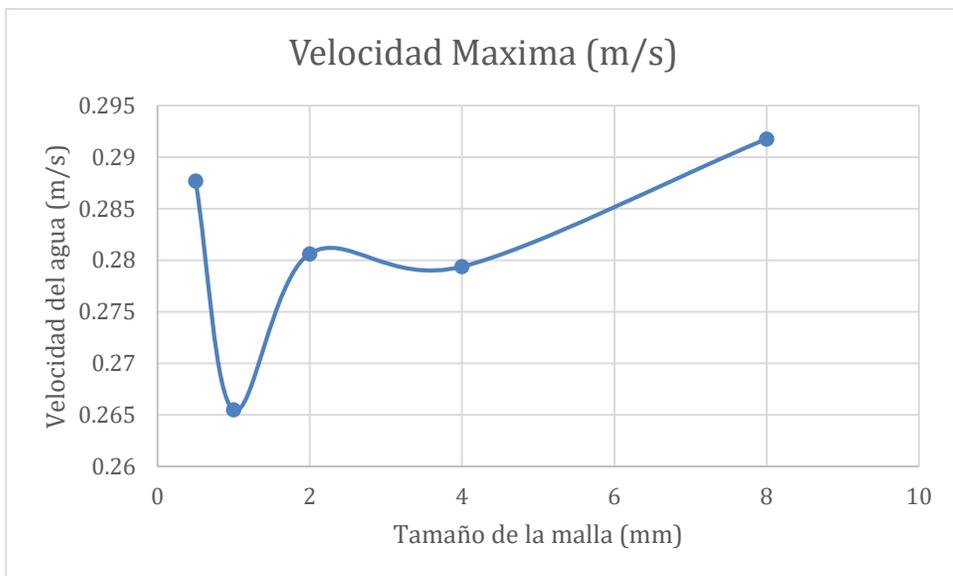
**Tabla de Convergencia reactor Airlift.**

Tamaño de malla (mm)	Velocidad Máxima (m/s)	Error %
8	0.41260201	N.A.
4	0.4143968	0.43310904
2	0.42241606	1.89842687
1	0.3967583	6.46684896
0.8	0.4452607	10.8930341



**Tabla de Convergencia reactor Panel Plano Volumen dividido.**

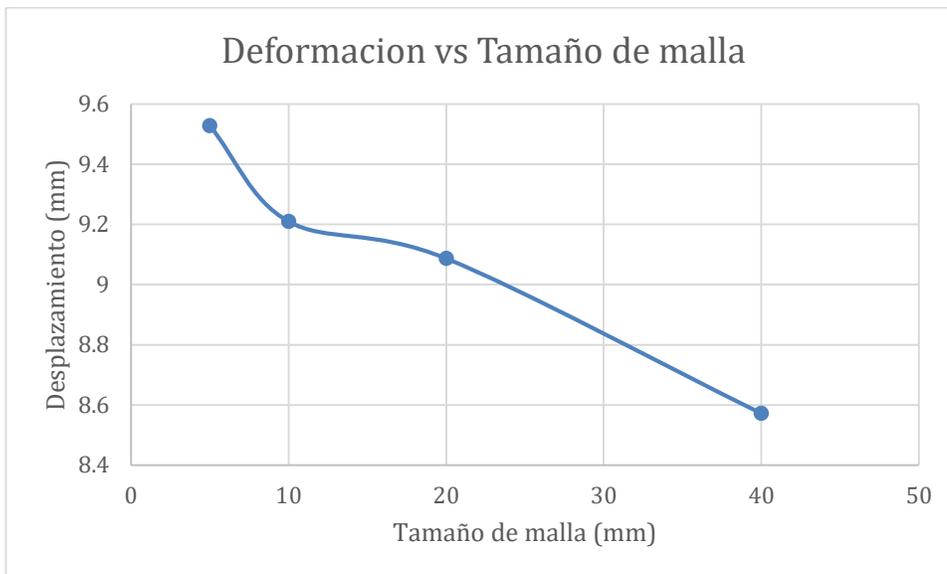
Tamaño de malla (mm)	Velocidad Maxima (m/s)	Error %
8	0.2917508	N.A.
4	0.27936995	4.43170427
2	0.2806224	0.44631148
1	0.2654741	5.70613103
0.5	0.2876796	7.71883025



## Tablas de convergencia simulacion estructural

Tamaño de malla (mm)	Elemental-Nodal	Elemental-Nodal	Desplazamiento Max. mm	# de elementos
	Nonlinear Stress MPa	Non-linear Stress MPa		
40	9.28	6.078	8.572	35085
20	9.414	6.11	9.087	48723
10	9.318	6.062	9.21	111513
5	10.61	6.055	9.528	369615
	No Prom	Prom		

Tamaño de malla mm	Elemental-Nodal	Elemental-Nodal	Desplazamiento Max. mm
	No Prom	Prom	
	Error (%)		
20,5	1.42341194	0.523731588	5.667436998
10,5	1.030264005	0.791817882	1.335504886
5	12.17719133	0.115606936	3.337531486



## ANEXO C. TABLAS DE SCORING

### Scoring para la geometría del tanque.

Diseños para el tanque del FBR							
Alternativas	Criterios						Peso del Criterio
	Simulacion	Alimentacion	Volumen cultivo	Flexibilidad	Mantenimiento	Espacio Ocupado	
	4	5	3	5	3	4	
Panel Plano	8	7	9	3	7	5	150
Airlift	2	3	9	5	4	5	107
Panel Plano VD	5	7	5	7	7	3	138
		DIFICULTAD			DIFICULTAD		

Para aspectos positivos	
Nulo	1
Muy bajo	2
Bajo	3
Poco bajo	4
Medio	5
Poco alto	6
Alto	7
Muy alto	8
Extra alto	9

Para aspectos negativos	
Extra alto	1
Muy alto	2
Alto	3
Poco alto	4
Medio	5
Poco bajo	6
Bajo	7
Muy bajo	8
Nulo	9

**Scoring para las alternativas del material del tanque.**

Material Del Tanque						
Alternativas	Criterios					
	Resistencia A Impactos	Translucidez	Vida Útil	Peso	Precio	
Peso Del Criterio	4	5	4	5	4	
Vidrio	3	8	4	4	5	108
Acrílico	7	7	2	7	6	130

PARA ASPECTOS POSITIVOS	
Nulo	1
Muy Bajo	2
Bajo	3
Poco Bajo	4
Medio	5
Poco Alto	6
Alto	7
Muy Alto	8
Extra Alto	9

PARA ASPECTOS NEGATIVOS	
Extra Alto	1
Muy Alto	2
Alto	3
Poco Alto	4
Medio	5
Poco Bajo	6
Bajo	7
Muy Bajo	8
Nulo	9

**Scoring para las alternativas de la estructura.**

Estructura							
Alternativas	Criterios						
	Resistencia a la corrosión	Practicidad de ensamble	Espacio ocupado	Precio	Capacidad de movimiento	Peso	
Peso del criterio	4	5	4	5	4	4	
Alternativa 1	3	4	3	3	6	3	92
Alternativa 2	3	8	5	6	3	6	132

Para aspectos positivos	
Nulo	1
Muy bajo	2
Bajo	3
Poco bajo	4
Medio	5
Poco alto	6
Alto	7
Muy alto	8
Extra alto	9

Para aspectos negativos	
Extra alto	1
Muy alto	2
Alto	3
Poco alto	4
Medio	5
Poco bajo	6
Bajo	7
Muy bajo	8
Nulo	9

**Scoring para el material de la estructura.**

Estructura							
Alternativas	Criterios						
	Resistencia a la corrosión	Resistencia	Montaje	Precio	Acabado	Resistencia a los impactos	
Peso del criterio	4	5	4	5	4	3	
Acero	3	8	6	4	5	8	140
Aluminio	7	4	7	3	8	3	132

PARA ASPECTOS POSITIVOS	
Nulo	1
Muy bajo	2
Bajo	3
Poco bajo	4
Medio	5
Poco alto	6
Alto	7
Muy alto	8
Extra alto	9

PARA ASPECTOS NEGATIVOS	
Extra alto	1
Muy alto	2
Alto	3
Poco alto	4
Medio	5
Poco bajo	6
Bajo	7
Muy bajo	8
Nulo	9

### Scoring para el sistema de iluminacion.

Sistema de iluminacion para un fotobiorreactor de panel plano								
Alternativas	Criterios							Peso del Criterio
	Cos to	Potencia Consumida	Vida Util (horas)	Generacion de calor	Mantenimiento	Espacio Requerido	Eficiencia luminca	
	4	5	4	5	3	4	4	
Bulbo Incandescente	7	3	1	3	5	3	2	97
Lampara Halogena	6	5	2	5	5	3	2	117
Lamparas Fluorescentes	4	5	3	7	5	3	7	143
Ddiodos LED	7	7	7	8	8	7	6	207
Fibra Optica	2	7	8	9	8	7	6	196

PARA ASPECTOS POSITIVOS	
Nulo	1
Muy bajo	2
Bajo	3
Poco bajo	4
Medio	5
Poco alto	6
Alto	7
Muy alto	8
Extra alto	9

PARA ASPECTOS NEGATIVOS	
Extra alto	1
Muy alto	2
Alto	3
Poco alto	4
Medio	5
Poco bajo	6
Bajo	7
Muy bajo	8
Nulo	9

**Scoring para el sistema de agitacion.**

Agitacion						
Alternativas	Criterios					Peso del criterio
	Precio	Consumo	Montaje	Mantenimiento	Impacto en el cultivo	
	4	5	4	4	5	
Inyeccion de aire	5	5	5	8	9	142
Medios mecanicos	4	6	3	5	4	98
Bombas	3	6	4	4	4	94

Para aspectos positivos	
Nulo	1
Muy bajo	2
Bajo	3
Poco bajo	4
Medio	5
Poco alto	6
Alto	7
Muy alto	8
Extra alto	9

Para aspectos negativos	
Extra alto	1
Muy alto	2
Alto	3
Poco alto	4
Medio	5
Poco bajo	6
Bajo	7
Muy bajo	8
Nulo	9

**Scoring para seleccionar el compresor.**

Alternativas de Compresor							
Alternativas	Criterios						Peso del Criterio
	Caudal	Potencia	Presion	Precio	Espacio	Valor Agregado	
	5	5	5	4	3	4	
Minicompresor	7	5	9	7	5	3	160
Comp. Dewalt	8	3	9	3	5	9	163
Bomba Pecera	3	6	2	7	7	1	108

Para aspectos positivos	
Nulo	1
Muy bajo	2
Bajo	3
Poco bajo	4
Medio	5
Poco alto	6
Alto	7
Muy alto	8
Extra alto	9

Para aspectos negativos	
Extra alto	1
Muy alto	2
Alto	3
Poco alto	4
Medio	5
Poco bajo	6
Bajo	7
Muy bajo	8
Nulo	9

## ANEXO D. CALCULO DE REYNOLDS

<b>Área</b>	<b>50000</b>	<b>mm<sup>2</sup></b>
<b>Perímetro h</b>	2100	mm
<b>Viscosidad cinemática</b>	8.98e-07	
<b>Radio húmedo</b>	23.8095238	mm
	0.02380952	m

<b>Velocidades (m/s)</b>	<b>Numero de Re</b>	<b>Posición x (mm)</b>
0.065	6893.63	10
0.2	21211.16	20
0.28	29695.62	30
0.3	31816.74	40
0.26	27574.50	50
0.1	10605.58	60
0.06	6363.35	70
0.06	6363.35	95
0.06	6363.35	120
0.05	5302.79	140
0.04	4242.23	160
0.03	3181.67	180
0.02	2121.12	200
0.02	2121.12	240
0.02	2121.12	280
0.02	2121.12	320
0.02	2121.12	360
0.02	2121.12	400
0.02	2121.12	420

**ANEXO E.  
CALCULO DE COMPRESOR**

<b>CAUDAL</b>	<b>Q=V*A</b>	
<b>DIAMETRO BOQUILLA</b>	12	mm
<b>V</b>	0.31	m/s
<b>A</b>	0.0001131	m <sup>2</sup>
<b>Caudal Parcial</b>	3.506E-05	m <sup>3</sup> /s
<b># boquillas</b>	12	
<b>Caudal</b>	25.2433253	L/min
<b>Caudal</b>	0.02524333	m <sup>3</sup> /min

<b>Valor de la simulación (Pa)</b>	<b>50</b>	
<b>Presión de Inyección</b>	74710.5	Pa
	0.747105	Bar
<b>Presión Atmosférica</b>	560	mmHg
	0.746605	Bar
<b>Relación Compresión</b>	1.000669698	
<b>Potencia Compresor</b>	0.00232312	HP
	1.73304762	W
<b>Potencia Motor</b>	2.166309525	W
<b>Eficiencia</b>	0.8	
<b>Corriente del Motor</b>	0.006534584	A

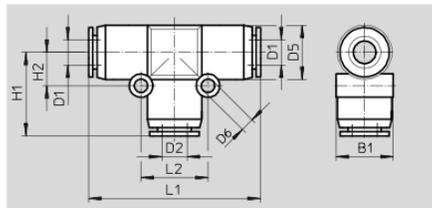
## ANEXO F. CATALOGOS

### Racores rápidos roscados QS, serie estándar

Hoja de datos

**FESTO**

Racor rápido en T QST



Dimensiones y datos para efectuar los pedidos														
Para tubo de diámetro exterior D1	Diámetro nominal [mm]	Para tubo de diámetro exterior D2	D5 ∅	D6 ∅	B1	H1	H2	L1	L2	Peso/ unidad [g]	Nº de art.	Tipo	PC <sup>1)</sup>	
4	2,6	4	10	3,2	10,4	17,2	6,5	34,4	13	7,5	★ 153128	QST-4	10	
											130802	QST-4-100	100	
6	4	6	13	3,2	13,5	20,1	8	40,2	16	11	★ 153129	QST-6	10	
											130803	QST-6-100	100	
8	5	8	15	3,2	15,6	22,2	9	44,4	18	16	★ 153130	QST-8	10	
											130804	QST-8-50	50	
10	6,7	10	17,5	4,2	18,2	25,2	12	50,4	24	25	★ 153131	QST-10	10	
											130805	QST-10-50	50	
12	8,7	12	21	4,2	21,7	28,4	14	56,8	28	36	★ 153132	QST-12	10	
											130806	QST-12-20	20	
16	10,7	16	25	4,2	25,6	33,1	12	66,2	24	44	★ 153133	QST-16	1	
<b>Reductor</b>														
6	2,3	4	13	3,2	13	19,5	8	40,1	16	11	★ 153134	QST-6-4	10	
											130820	QST-6-4-100	100	
8	2,3	4	14,5	3,2	15,1	21,7	9	44,4	18	14	★ 130613	QST-8-4	10	
											3,5	6	14,5	3,2
10	3,7	6	17,5	4,2	18,2	25	12	50,4	24	22	★ 130614	QST-10-6	10	
											4,9	8	17,5	4,2
12	5,1	8	21	4,2	21,7	27,7	14	56,8	28	32	★ 130615	QST-12-8	10	
											6,1	10	21	4,2
16	7,6	12	25	4,2	25,7	33,2	12	66,2	24	45	★ 130616	QST-16-12	1	

1) Cantidad por unidad de embalaje

Programa básico de Festo

★ En 24 horas, listo para la entrega desde la fábrica de Festo  
☆ En 5 días, listo para la entrega desde la fábrica de Festo

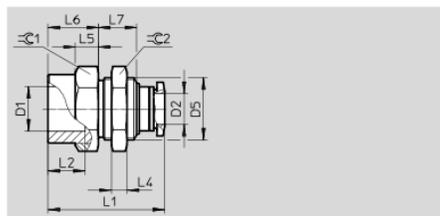
## Racores rápidos roscados QS, serie estándar

FESTO

Hoja de datos

### Racor pasamuros QSSF

Con rosca interior



#### Dimensiones y datos para efectuar los pedidos

Conexión	Diámetro nominal [mm]	Para tubo de diámetro exterior D2	D5 ∅	L1	L2	L4	L5	L6	L7	≈C 1	≈C 2	Peso/ unidad [g]	Nº de art.	Tipo	PE <sup>1)</sup>
G <sup>1</sup> / <sub>8</sub>	3	4	M12x1	24,2	7	4	5	9	9	14	14	17	153162	QSSF- <sup>1</sup> / <sub>8</sub> -4-B	10
	5	6	M14x1	26,4	7	4	6	10	10,2	17	17	25	153163	QSSF- <sup>1</sup> / <sub>8</sub> -6-B	10
	7	8	M16x1	27	7	4	6	10	9,8	19	19	30	153165	QSSF- <sup>1</sup> / <sub>8</sub> -8-B	10
G <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	3	4	M12x1	27,5	9,5	4	6	12,3	9	17	14	24	190655	QSSF- <sup>1</sup> / <sub>4</sub> -4-B	10
	5	6	M14x1	28,7	9,5	4	6	12,3	10,2	17	17	27	153164	QSSF- <sup>1</sup> / <sub>4</sub> -6-B	10
	7	8	M16x1	30	9,5	4	6	13	9,8	19	19	34	153166	QSSF- <sup>1</sup> / <sub>4</sub> -8-B	10
G <sup>3</sup> / <sub>8</sub>	5	6	M14x1	30,9	11	4	6,5	14,5	10,2	21	17	36	190656	QSSF- <sup>3</sup> / <sub>8</sub> -6-B	10
	7	8	M16x1	31,5	11	4	6,5	14,5	9,8	21	19	38	153167	QSSF- <sup>3</sup> / <sub>8</sub> -8-B	10
	9	10	M20x1	32,7	9,5	5	7	13	11,1	24	24	57	153168	QSSF- <sup>1</sup> / <sub>4</sub> -10-B	10
G <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	11	12	M22x1	36,8	11	6	7	14,5	12,4	24	27	66	153170	QSSF- <sup>3</sup> / <sub>8</sub> -12-B	10
	15	16	M27x1,5	40,1	14	6	7	17,8	12,4	24	27	70	153171	QSSF- <sup>1</sup> / <sub>2</sub> -12-B	1
				42,6	14	9	8,5	17,3	15,4	29	32	116	190657	QSSF- <sup>1</sup> / <sub>2</sub> -16-B	1

1) Cantidad por unidad de embalaje

## Tubos de material sintético PAN

Hoja de datos

FESTO

### Tubo de material sintético PAN

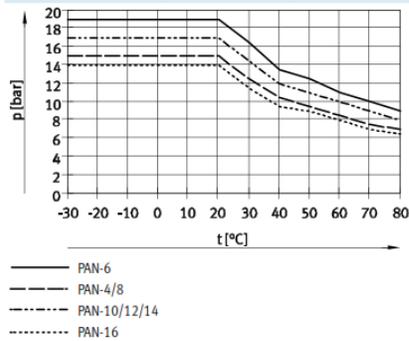
Térmica y mecánicamente altamente resistente.



Condiciones de funcionamiento y del entorno					
Tipo	PAN-4/8	PAN-6	PAN-10/12	PAN-14	PAN-16
Presión de funcionamiento en función de la temperatura [bar]	-0,95 ... +15 → diagrama	-0,95 ... +19 → diagrama	-0,95 ... +17 → diagrama		-0,95 ... +14 → diagrama
Fluido de trabajo	Aire comprimido según ISO 8573-1:2010 [7:-;-]				
Temperatura ambiente [°C]	-30 ... +80				
Homologación	TUV				
Clasificación marítima	Véase certificado (color: plateado y natural) <sup>1)</sup>			-	Véase certificado (color: plateado y natural) <sup>1)</sup>
Características del tubo flexible	Apropiado para cadenas de arrastre en aplicaciones con número de ciclos elevado				
Condiciones de ensayo del tubo flexible	Apropiado para cadenas de arrastre: > 5 millones de ciclos según la norma de Festo 942021				

1) Más información [www.festo.com/sp](http://www.festo.com/sp) → Certificates.

### Presión de funcionamiento p en función de la temperatura t



### Accesorios

Tipo	→ Internet
	
Racores recomendados	
- Racores rápidos roscados QS <sup>1)</sup>	qs
Muy apropiado	
- Racores rápidos roscados CRQS <sup>1)</sup>	crqs
- Racores rápidos roscados NPQH <sup>2)</sup>	npqh
- Racores rápidos roscados NPQP <sup>3)</sup>	npqp
- Racores rápidos roscados NPQM <sup>2)</sup>	npqm
- Racores de encastre NPKA <sup>4)</sup>	npka
- Racores NPCK <sup>5)</sup>	npck
- Racores rápidos CK <sup>6)</sup>	ck
- Racores de boquilla CN <sup>6)</sup>	cn
Apropiado con limitaciones	
- Racores rápidos roscados QS-V0 <sup>3)</sup>	qs-v0

1) No para diámetro exterior 14 mm

2) No para diámetro exterior 16 mm

3) No para diámetro exterior 14/16 mm

4) Sólo diámetro exterior 6 mm

5) Sólo diámetro exterior 4/6/8/10 mm

6) Sólo diámetro exterior 4/6/8 mm

### Materiales

Dureza Shore	D 55 ±3
Tubo flexible	TPE-A
Características del material	Conformidad con RoHS
	Sin cobre ni PTFE

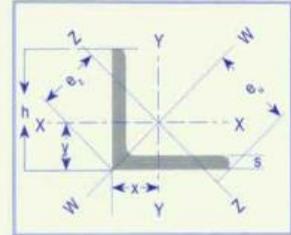
## Tubos de material sintético PAN

Hoja de datos

FESTO

Dimensiones y referencias								
Diámetro exterior	Diámetro interior	Radio de curvatura mín.	Radio de curvatura relevante para el caudal	Peso	Color	N° art.	Tipo	PE <sup>1)</sup>
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[kg/m]				[m]
12	8,4	29	64	0,060	Plateado	152702	PAN-12x1,75-SI	50
					Plateado	553892	PAN-12x1,75-SI-200	200
					Azul	553910	PAN-12x1,75-BL	50
					Azul	553898	PAN-12x1,75-BL-200	200
					Negro	553916	PAN-12x1,75-SW	50
					Negro	553904	PAN-12x1,75-SW-200	200
					Natural	546288	PAN-12x1,75-NT	50
					Verde	553922	PAN-12x1,75-GN	50
					Rojo	553928	PAN-12x1,75-RT	50
					Amarillo	553934	PAN-12x1,75-GE	50
14	10	50	80	0,077	Plateado	570392	PAN-14x2-SI	50
16	12	67	94	0,092	Plateado	152703	PAN-16x2-SI	50
					Plateado	553893	PAN-16x2-SI-100	100
					Azul	553911	PAN-16x2-BL	50
					Azul	553899	PAN-16x2-BL-100	100
					Negro	553917	PAN-16x2-SW	50
					Negro	553905	PAN-16x2-SW-100	100
					Natural	546289	PAN-16x2-NT	50
					Verde	553923	PAN-16x2-GN	50
					Rojo	553929	PAN-16x2-RT	50
					Amarillo	553935	PAN-16x2-GE	50

1) Unidad de embalaje

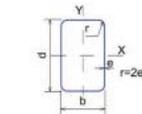


**ÁNGULO TIPO AMERICANO DE LADOS IGUALES**

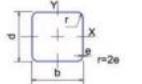
PERFILES EN L	Dimensiones y propiedades para el diseño															
	DIMENSIONES			DISTANCIAS DE LOS EJES			AREA	PESO	PROPIEDADES ELASTICAS							
	ALTURA=ALA		RADIOS	x=y	w	z			EJE X-X = Y-Y			EJE W-W		EJE Z-Z		
DESIGNACIÓN	h	s	r1	cm	cm	cm	cm <sup>2</sup>	kg/m	Ix	Sx	rx	ln	m	Iz	Sz	rz
	mm	mm	mm	cm	cm	cm	cm <sup>2</sup>	kg/m	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm <sup>4</sup>	cm	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm
L 1/8" X 3/4"	19.05	3.17	3.20	0.58	1.34	0.82	1.11	0.88	0.37	0.28	0.58	0.58	0.73	0.16	0.19	0.38
L 1/8" X 1"	25.40	3.17	3.20	0.76	1.79	1.07	1.52	1.19	0.92	0.51	0.79	1.24	0.93	0.41	0.38	0.48
L 1/8" X 1 1/4"	31.75	3.17	4.70	0.89	2.24	1.25	1.93	1.50	1.83	0.80	0.97	2.91	1.19	0.83	0.66	0.60
L 1/8" X 1 1/2"	38.10	3.17	4.70	1.07	2.69	1.51	2.34	1.83	3.25	1.18	1.17	5.41	1.47	1.24	0.82	0.73
L 1/8" X 2"	50.80	3.17	6.30	1.40	3.58	1.97	3.10	2.46	7.91	2.13	1.60	12.49	1.97	3.32	1.68	0.99
L 3/16" X 1"	25.40	4.76	3.20	0.81	1.79	1.14	2.21	1.73	1.25	0.72	0.76	2.08	0.93	0.41	0.36	0.48
L 3/16" X 1 1/4"	31.75	4.76	4.70	0.97	2.24	1.37	2.79	2.20	2.54	1.16	0.97	3.74	1.19	0.83	0.61	0.60
L 3/16" X 1 1/2"	38.10	4.76	4.70	1.12	2.69	1.58	3.43	2.68	4.58	1.64	1.17	7.07	1.44	1.66	1.05	0.73
L 3/16" X 2"	50.80	4.76	6.30	1.45	3.58	2.00	4.61	3.63	11.45	3.11	1.57	17.48	1.95	4.57	2.28	0.99
L 3/16" X 2 1/2"	63.50	4.76	6.30	1.75	4.49	2.47	5.81	4.61	22.89	4.92	1.98	36.52	2.46	9.15	3.70	1.24
L 3/16" X 3"	76.20	4.76	7.90	2.08	5.38	2.94	7.03	5.52	40.01	7.22	2.39	64.38	3.03	16.12	5.48	1.51
L 1/4" X 1"	25.4	6.35	3.20	0.86	1.79	1.21	2.80	2.22	1.54	0.92	0.74	2.49	0.91	0.83	0.69	0.48
L 1/4" X 1 1/4"	31.75	6.35	4.70	1.02	2.24	1.44	3.72	2.86	3.21	1.49	0.94	4.99	1.16	1.24	0.86	0.60
L 1/4" X 1 1/2"	38.10	6.35	4.70	1.19	2.69	1.68	4.40	3.48	5.83	2.20	1.14	8.74	1.42	2.49	1.48	0.73
L 1/4" X 2"	50.80	6.35	6.30	1.50	3.58	2.10	6.06	4.75	14.57	4.10	1.55	22.47	1.93	5.82	2.77	0.99
L 1/4" X 2 1/2"	63.50	6.35	6.30	1.83	4.49	2.54	7.68	6.10	29.14	6.39	1.96	45.36	2.43	11.65	4.58	1.24
L 1/4" X 3"	76.20	6.35	7.90	2.13	5.38	2.97	9.29	7.29	51.60	9.50	2.36	78.66	2.94	20.39	6.86	1.49
L 1/4" X 4"	101.60	6.35	9.50	2.77	7.18	3.91	12.52	9.82	124.90	17.20	3.18	191.39	3.96	48.10	12.30	2.00
L 5/16" X 2"	50.80	7.94	6.30	1.55	3.58	2.18	7.42	5.83	17.46	4.92	1.52	26.63	1.90	7.07	3.24	0.99
L 5/16" X 2 1/2"	63.50	7.94	6.30	1.88	4.49	2.64	9.48	7.44	35.38	7.87	1.93	55.35	2.41	14.56	5.51	1.24
L 5/16" X 3"	76.20	7.94	7.90	2.21	5.38	3.04	11.48	9.08	62.90	11.60	2.34	96.98	2.92	24.97	8.21	1.47
L 5/16" X 4"	101.60	7.94	9.50	2.84	7.18	4.01	15.48	12.20	154.40	21.10	3.15	239.33	3.93	61.60	15.36	2.00
L 3/8" X 2"	50.80	9.53	6.30	1.63	3.58	2.30	8.77	6.99	19.98	5.74	1.50	30.80	1.87	8.32	3.61	0.99
L 3/8" X 2 1/2"	63.50	9.53	6.30	1.93	4.49	2.71	11.16	8.78	40.79	9.34	1.91	64.09	2.38	17.06	6.29	1.24
L 3/8" X 3"	76.20	9.53	7.90	2.26	5.38	3.14	13.61	10.72	73.30	13.60	2.31	112.79	2.89	29.55	9.41	1.47
L 3/8" X 4"	101.60	9.53	9.50	2.89	7.18	4.03	18.45	14.58	181.90	24.90	3.12	283.03	3.91	73.25	18.17	1.98
L 3/8" X 5"	127.00	9.53	12.70	3.53	8.96	4.97	23.29	18.30	363.80	39.70	3.96	579.60	4.99	148.00	29.80	2.52
L 3/8" X 6"	152.40	9.53	12.70	4.16	10.76	5.88	28.13	22.17	640.60	57.80	4.78	1018.60	6.02	262.60	44.70	3.05
L 1/2" X 3"	76.20	12.70	7.90	2.36	5.38	3.32	17.74	13.99	92.40	17.50	2.29	142.76	2.84	38.29	11.53	1.47
L 1/2" X 4"	101.60	12.70	9.50	2.99	7.18	4.21	24.19	19.05	231.40	32.30	3.10	361.28	3.86	94.48	22.44	1.98
L 1/2" X 5"	127.00	12.70	12.70	3.63	8.96	5.12	30.85	24.11	468.30	51.60	3.91	746.50	4.94	190.10	37.20	2.49
L 1/2" X 6"	152.40	12.70	12.70	4.27	10.76	6.03	37.10	29.17	828.70	75.50	4.72	1326.10	5.97	331.30	54.90	2.99
L 5/8" X 4"	101.60	15.88	9.50	3.12	7.18	4.39	29.74	23.36	277.20	39.30	3.05	433.71	3.81	115.71	26.35	1.98
L 5/8" X 6"	152.40	15.88	12.70	4.39	10.76	6.20	45.87	36.01	1005.60	92.80	4.67	1604.80	5.92	406.40	65.60	2.98
L 3/4" X 6"	152.40	19.05	12.70	4.52	10.76	6.38	54.45	42.71	1171.70	109.10	4.65	1859.20	5.85	484.20	75.90	2.98
L 1" X 6"	152.40	25.40	12.70	4.72	10.76	6.66	70.97	55.66	1476.00	140.00	4.57	2327.80	5.73	624.20	93.70	2.96

Número de Control: 950-10-F-8

LOS PERFILES TUBILARES CUMPLEN CON LA NORMA ASTM A 500 GRADO C Y GRADO B  
 GRADO C: ESFUERZO DE FLECCIÓN  $F_y = 3.522 \text{ Kgr/cm}^2$  (50.000 PSI) (350 MPa)  
 Los tubos en  $e = 1.5 \text{ m}$  se suministran en grado B: ESFUERZO DE FLECCIÓN  $F_y = 3.241 \text{ Kgr/cm}^2$  (46.000 PSI) (350 MPa)  
**NOTA: LOS TUBOS GALVANIZADOS SE FABRICAN SOBRE PEDIDO.**



TAMAÑO PERFIL		ESPESOR DE PARED e (mm)	PESO (kg/m)	FLEXIÓN EN X - X				FLEXIÓN EN Y - Y				TORSIÓN		UNIDAD DE EMPAQUE	
PUL.	MM			ÁREA cm <sup>2</sup>	MOMENTO DE INERCIA Ix cm <sup>4</sup>	MÓDULO DE SECCIÓN Sx cm <sup>3</sup>	RADIO DE GIRO rx cm	MOMENTO DE INERCIA Iy cm <sup>4</sup>	MÓDULO DE SECCIÓN Sy cm <sup>3</sup>	RADIO DE GIRO ry cm	MÓDULO DE PLÁSTICO Zx cm <sup>3</sup>	MÓDULO DE PLÁSTICO Zy cm <sup>3</sup>	MOMENTO DE INERCIA J cm <sup>4</sup>		MÓDULO DE ELÁSTICO B cm <sup>4</sup>
2X1 2	50 x 13	1.50	1.37	1.72	4.54	1.81	1.62	6.55	6.77	1.54	2.48	6.90	1.81	1.40	30
		1.90	1.77	2.25	7.72	2.97	1.85	2.78	2.06	1.11	3.70	2.34	6.71	2.56	
		2.00	2.31	2.94	9.76	3.76	1.82	3.49	2.58	1.09	4.74	2.99	8.63	4.49	
2X1 1/2	50 x 20	1.50	2.02	3.09	11.20	4.44	1.79	4.98	3.03	1.07	5.69	3.58	10.41	5.21	25
		1.90	2.84	4.26	13.84	4.81	2.05	6.81	3.60	1.24	7.95	4.97	14.26	9.98	
		2.00	2.93	3.73	17.69	5.90	2.18	6.86	4.57	1.52	7.22	5.26	18.50	7.66	
2 30X1 1/2	60 x 40	1.50	4.23	5.41	24.23	8.11	2.12	11.79	6.23	1.48	10.16	7.27	26.96	18.36	20
		2.00	2.60	4.09	21.18	7.06	2.15	10.32	5.45	1.20	8.75	6.20	23.07	9.18	
		2.00	4.90	6.24	44.67	11.73	2.06	14.38	7.86	1.59	14.85	9.14	38.00	13.79	
2X1 1/2	75 x 38	1.50	2.57	3.27	14.92	6.54	2.76	6.54	4.48	1.81	8.07	5.00	20.50	7.74	16
		2.00	3.27	4.29	32.06	8.42	2.73	10.90	5.72	1.99	10.48	6.47	26.05	9.93	
		2.00	4.10	5.29	38.64	10.14	2.70	13.05	6.85	1.57	12.73	7.85	32.48	11.94	
3 316 1X1 1/2	80 x 40	1.50	2.71	3.45	18.99	7.25	2.90	9.94	4.97	1.70	8.93	5.53	23.81	8.58	16
		2.00	3.06	4.04	27.36	9.34	2.87	12.72	6.26	1.67	11.61	7.17	30.99	11.02	
		2.00	4.30	5.99	45.11	11.28	2.84	15.26	7.63	1.80	14.15	8.72	37.81	13.28	
1 10X2	90 x 30	1.50	1.19	1.61	32.25	12.66	2.81	17.28	6.78	1.93	16.54	10.16	44.30	15.36	16
		2.00	2.18	4.05	44.80	9.96	3.33	18.15	7.26	2.12	12.09	6.67	41.32	12.32	
		2.00	4.19	5.34	58.15	12.80	3.30	23.41	9.38	2.09	15.78	10.92	53.63	15.93	
4X1 47	100 x 40	1.50	3.17	6.59	70.89	15.66	2.67	26.28	11.31	2.07	19.21	12.84	66.75	19.26	16
		2.00	6.13	7.81	82.84	18.24	2.89	32.80	13.12	2.09	22.67	10.59	77.38	22.49	
		2.00	4.19	5.34	65.38	13.08	3.20	15.81	7.81	1.71	16.54	8.89	41.99	13.91	
4X2	100 x 50	1.50	3.17	6.59	70.89	15.66	2.67	26.28	11.31	2.07	19.21	12.84	66.75	19.26	16
		2.00	6.13	7.81	82.84	18.24	2.89	32.80	13.12	2.09	22.67	10.59	77.38	22.49	
		2.00	4.50	5.74	74.98	15.00	3.02	25.87	10.27	2.12	18.20	11.46	61.72	17.75	
4 3/4 42 3/8	120 x 60	1.50	3.43	6.94	138.64	22.44	4.44	45.78	15.28	2.57	27.60	16.92	108.88	28.42	16
		2.00	6.74	8.69	187.03	27.42	4.41	55.86	18.59	2.56	33.54	20.77	126.18	32.22	
		2.00	8.01	10.20	195.98	32.18	4.38	65.03	21.71	2.20	40.05	24.46	158.84	37.73	
6X2	150 x 50	1.50	6.96	11.41	298.25	36.81	5.12	52.85	21.06	2.10	51.43	22.49	150.30	38.36	16
		2.00	11.73	14.95	381.29	38.05	5.05	66.16	26.47	2.10	66.47	30.13	192.02	48.31	
		4.00	14.87	18.50	494.80	39.25	5.00	316.37	63.71	4.10	91.67	72.30	584.06	105.15	
8X4	150 x 100	1.50	21.69	27.62	834.69	111.29	5.90	444.19	88.84	4.01	136.68	100.30	957.04	147.81	9
		2.00	16.13	20.35	969.10	96.32	6.87	185.31	53.00	3.00	124.52	98.08	821.83	98.03	
		4.00	23.58	30.03	1,384.48	138.45	8.74	255.38	72.37	2.92	176.25	82.79	741.83	122.47	
8X4	200 x 100	1.50	18.01	22.95	1,398.71	119.87	7.23	410.78	92.16	4.23	148.04	91.70	988.06	142.91	9
		2.00	26.40	33.63	1,702.21	170.22	7.12	576.91	115.28	4.14	212.27	121.20	1,428.66	208.83	
		4.00	28.18	33.26	2,052.78	204.03	8.75	609.85	121.97	4.48	258.51	126.94	1,829.94	217.49	
10X6	250 x 150	1.50	30.11	38.36	2,384.11	254.33	9.80	1,502.96	201.06	6.27	319.76	225.48	2,282.88	322.32	9
		2.00	30.11	38.36	4,865.22	271.01	10.29	722.77	144.50	6.54	348.15	199.89	2,485.91	265.65	
		7.00	41.43	52.78	5,405.64	263.71	10.17	954.21	150.84	4.25	472.62	215.04	2,764.32	246.77	
14X6	300 x 150	1.50	30.11	38.36	4,865.22	271.01	10.29	722.77	144.50	6.54	348.15	199.89	2,485.91	265.65	1
		7.00	41.43	52.78	5,405.64	263.71	10.17	954.21	150.84	4.25	472.62	215.04	2,764.32	246.77	
		10.00	89.04	113.42	15,713.90	1,047.59	11.77	1,223.86	24,972.90	1,577.87	1,223.86	24,972.90	1,577.87		
16X6	400 x 200	1.50	60.00	76.87	21,321.00	1,860.15	14.40	7,274.25	727.43	8.42	1,319.03	815.15	17,621.93	1,299.57	1
		2.00	60.00	76.87	21,321.00	1,860.15	14.40	7,274.25	727.43	8.42	1,319.03	815.15	17,621.93	1,299.57	
		2.00	60.00	76.87	21,321.00	1,860.15	14.40	7,274.25	727.43	8.42	1,319.03	815.15	17,621.93	1,299.57	



TAMAÑO PERFIL		ESPESOR DE PARED e (mm)	PESO (kg/m)	FLEXIÓN				MÓDULO DE PLÁSTICO		TORSIÓN		UNIDAD DE EMPAQUE
PUL.	MM			ÁREA cm <sup>2</sup>	MOMENTO DE INERCIA Ix = Iy cm <sup>4</sup>	MÓDULO DE SECCIÓN Sx = Sy cm <sup>3</sup>	RADIO DE GIRO rx = ry cm	MÓDULO DE PLÁSTICO Zx = Zy cm <sup>3</sup>	MOMENTO DE INERCIA J cm <sup>4</sup>	MÓDULO DE ELÁSTICO B cm <sup>4</sup>		
1 X 1	25 X 25	1.50	1.06	1.35	1.22	0.97	0.95	1.17	2.03	1.48	36	
		2.00	1.26	1.73	1.48	1.19	0.93	1.47	2.58	1.82		
		2.50	1.64	2.09	1.89	1.35	0.90	1.71	3.07	2.11		
1 4/7 X 1 4/7	40 X 40	1.50	1.70	2.25	5.49	2.75	1.96	2.22	6.77	4.13	25	
		2.00	2.31	2.94	6.94	3.47	1.94	4.13	11.26	5.25		
		2.50	2.92	3.59	8.22	4.11	1.91	4.97	13.79	6.25		
2 X 2	90 X 90	1.50	2.24	2.80	11.07	4.43	1.97	5.15	17.45	6.86	25	
		2.00	2.93	3.73	14.15	5.86	1.95	6.66	22.73	8.33		
		2.50	3.80	4.99	16.94	6.76	1.82	8.07	27.79	10.26		
2 1/2 X 2 1/2	60 X 60	1.50	2.71	3.45	19.92	6.51	2.38	7.53	30.53	9.78	25	
		2.00	3.26	4.54	25.14	8.38	2.35	9.79	39.91	12.81		
		2.50	4.29	5.99	30.34	10.11	2.33	11.93	48.92	15.26		
2 3/4 X 2 3/4	70 X 70	1.50	5.19	6.61	35.13	11.71	2.31	12.90	57.57	17.73	16	
		2.00	6.07	7.74	42.01	14.60	2.09	28.90	180.79	38.94		
		2.50	4.19	5.34	40.73	11.84	2.78	13.02	64.10	17.90		
3 X 3	75 X 75	1.50	5.17	6.59	49.41	14.12	2.74	16.94	78.79	21.27	16	
		2.00	6.13	7.81	57.53	16.44	2.71	19.42	92.90	24.82		
		2.50	6.80	8.41	71.62	19.10	2.92	22.49	115.14	28.81		
3 1/2 X 3 1/2	90 X 90	1.50	6.07	7.74	42.01	14.60	2.09	28.90	180.79	38.94	9	
		2.00	8.01	10.20	127.28	29.29	3.53	33.04	202.14	42.99		
		2.50	8.07	7.74	123.01	24.60	2.99	28.90	180.79	38.94		
4 X 4	100 X 100	1.50	7.53	9.59	100.63	30.13	3.96	34.86	235.64	45.27	9	
		2.00	8.96	11.41	177.00	35.41	2.94	41.21	279.48	53.27		
		4.00	11.73	14.95	226.35	45.27	3.89	53.30	364.04	68.31		
5 1/2 X 5 1/2	125 X 125	1.50	16.98	21.63	311.47	62.29	3.79	75.10	501.39	94.95	9	
		2.00	16.13	20.59	381.70	80.16	3.22	100.25	917.81	113.90		
		2.50	23.28	30.03	819.72	121.44	3.22	143.72	1,320.14	163.97		
6 X 6	150 X 150	1.50	18.01	22.95	807.82	107.71	5.93	124.87	1,267.82	161.93	9	
		2.00	26.40	33.63	1,145.91	152.79	5.84	179.88	1,843.64	230.58		
		2.50	30.11	38.36	2,410.09	241.01	7.93	278.87	3,771.59	362.84		
7 7/8 X 7 7/8	200 X 200	1.50	41.43	52.78	2,226.47	222.65	7.83	378.83	5,158.78	427.67	1	
		2.50	50.00	75.79	7,315.83	583.25	9.82	682.67	11,596.64	881.14		
		10.00	73.34	93.42	8,841.86	707.35	9.73	832.79	14,229.85	1,0		

**BACK-UP RING MEDIDAS ESTANDAR**

Back-Up Ring SIZE	MEASUREMENTS IN MILLIMETERS										
	ID	NBR ±	FKM ±	W	±	T	±	A	±	R	±
R0004	2.44	0.13	+0.13/-0.13	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0005	3.23	0.13	+0.13/-0.14	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0006	3.56	0.13	+0.13/-0.14	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0007	4.34	0.13	+0.13/-0.14	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0008	5.13	0.13	+0.13/-0.14	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0009	5.94	0.13	+0.13/-0.14	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0010	6.73	0.13	+0.13/-0.15	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0011	8.31	0.13	+0.13/-0.15	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0012	9.91	0.13	+0.13/-0.16	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0013	11.56	0.13	+0.13/-0.16	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0014	13.16	0.13	+0.13/-0.17	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0015	14.73	0.18	+0.18/-0.22	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0016	16.33	0.23	+0.23/-0.28	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0017	17.91	0.23	+0.23/-0.28	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0018	19.51	0.23	+0.23/-0.29	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0019	21.08	0.23	+0.23/-0.29	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0020	22.68	0.23	+0.23/-0.3	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0021	24.26	0.23	+0.23/-0.3	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0022	25.86	0.25	+0.25/-0.33	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0023	27.43	0.25	+0.25/-0.34	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0024	29.03	0.25	+0.25/-0.34	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0025	30.61	0.28	+0.28/-0.37	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0026	32.21	0.28	+0.28/-0.38	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0027	33.78	0.28	+0.28/-0.38	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0028	35.38	0.33	+0.33/-0.44	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0029	38.56	0.33	+0.33/-0.45	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0030	41.73	0.33	+0.33/-0.46	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0031	44.91	0.38	+0.38/-0.52	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0032	48.09	0.38	+0.38/-0.53	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0033	51.26	0.46	+0.46/-0.61	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0034	54.43	0.46	+0.46/-0.62	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0035	57.61	0.46	+0.46/-0.63	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0036	60.78	0.46	+0.46/-0.64	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0037	63.96	0.46	+0.46/-0.65	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0038	67.13	0.51	+0.51/-0.71	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0039	70.31	0.51	+0.51/-0.72	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0040	73.48	0.51	+0.51/-0.73	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0041	76.66	0.61	+0.61/-0.84	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0042	83.01	0.61	+0.61/-0.86	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0043	89.36	0.61	+0.61/-0.88	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0044	95.71	0.69	+0.69/-0.97	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0045	102.06	0.69	+0.69/-0.99	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0046	108.41	0.76	+0.76/-1.09	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0047	114.76	0.76	+0.76/-1.11	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0048	121.11	0.76	+0.76/-1.13	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0049	127.46	0.94	+0.94/-1.32	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0050	133.81	0.94	+0.94/-1.34	1.35	0.08	1.20	0.08	1.14	0.08	2.21	0.25
R0102	1.96	0.13	+0.13/-0.13	2.18	0.08	1.28	0.08	1.14	0.08	3.28	0.25
R0103	2.77	0.13	+0.13/-0.14	2.18	0.08	1.28	0.08	1.14	0.08	3.28	0.25
R0104	3.56	0.13	+0.13/-0.14	2.18	0.08	1.28	0.08	1.14	0.08	3.28	0.25
R0105	4.34	0.13	+0.13/-0.14	2.18	0.08	1.28	0.08	1.14	0.08	3.28	0.25
R0106	5.13	0.13	+0.13/-0.14	2.18	0.08	1.28	0.08	1.14	0.08	3.28	0.25
R0107	5.94	0.13	+0.13/-0.14	2.18	0.08	1.28	0.08	1.14	0.08	3.28	0.25

**BACK-UP RING MEDIDAS ESTANDAR**

## ANEXO G. PLANOS

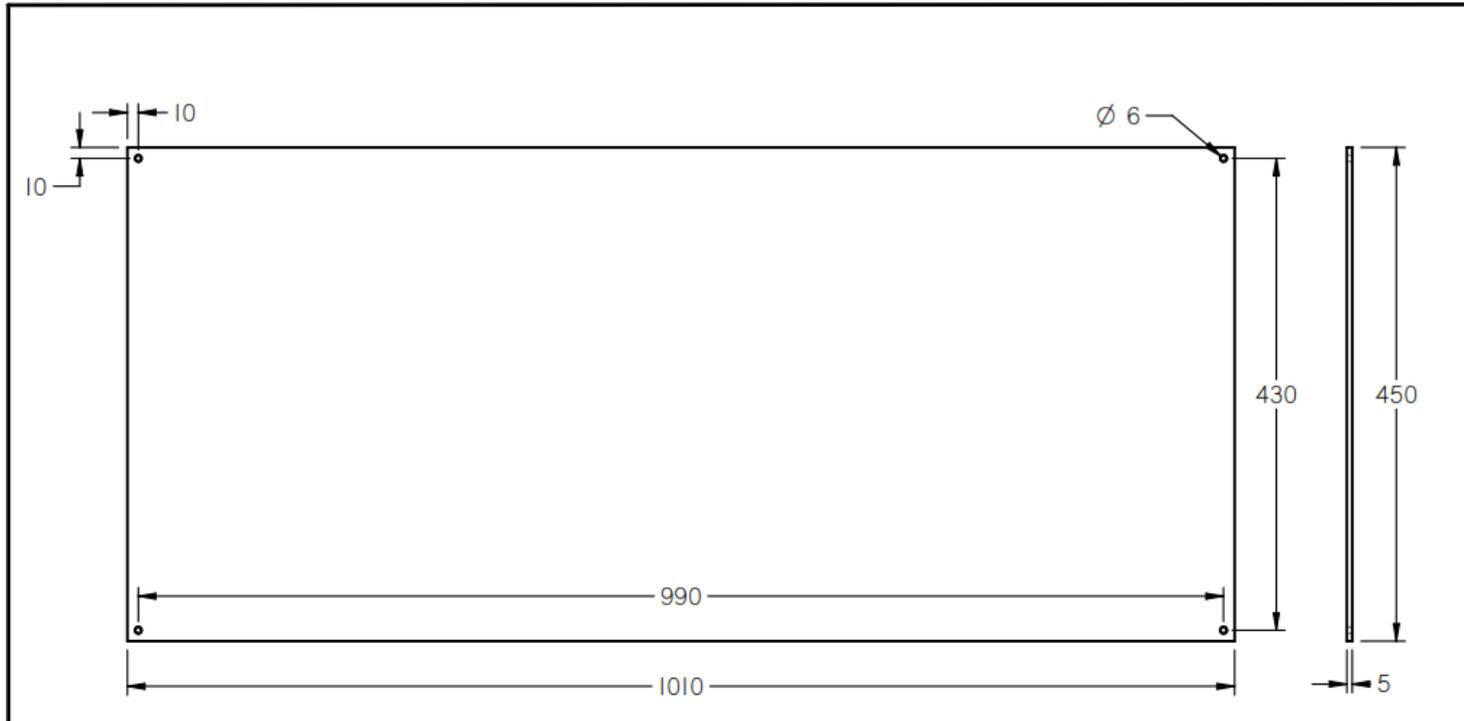
PERFIL CUADRADO 1in

350

350

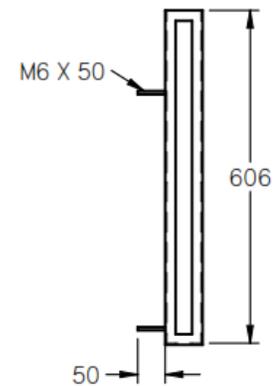
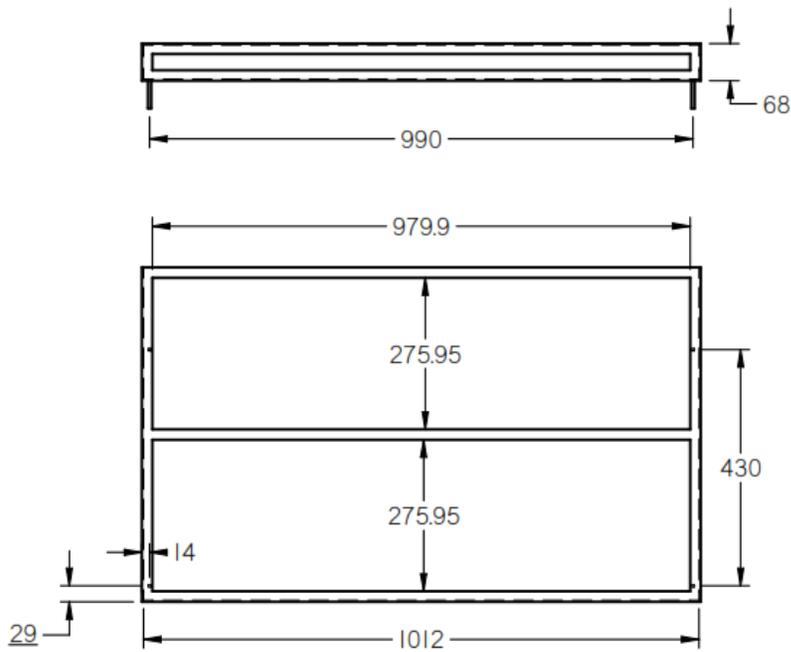
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

	<b>UNIVERSIDAD DE AMÉRICA</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECÁNICA	
	NOMBRE DEL PROYECTO: <i>DESARROLLO DE LA INGENIERIA DE DETALLE          PARA UN FBR PANEL PLANO</i>	
Considere una tolerancia de $\pm 0.1$ mm a no ser que se señale una distinta.	NOMBRE DEL PLANO: <b>A4</b> <b>BASE</b>	ELABORÓ: JOSEPH SEBASTIÁN VELANDIA BARÓN DANIEL ALEJANDRO TORRES BUSTOS
Escala: 1:5	N° Pieza: 01	FECHA: 20/11/2018
Hoja 1 de 1		



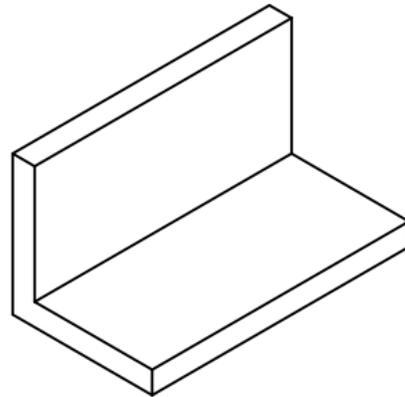
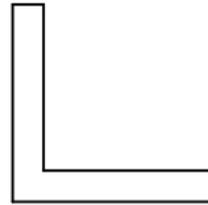
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

	<b>UNIVERSIDAD DE AMÉRICA</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECÁNICA	
	NOMBRE DEL PROYECTO: DESARROLLO DE LA INGENIERIA DE DETALLE PARA UN FBR PANEL PLANO	
	NOMBRE DEL PLANO: <b>A4</b> PANEL DE LUZ	
Considere una tolerancia de $\pm 0.1$ mm a no ser que se señale una distinta.	ELABORÓ: JOSEPH SEBASTIÁN VELANDIA BARÓN DANIEL ALEJANDRO TORRES BUSTOS	FECHA: 20/11/2018
Escala 1:5	N° Pieza 02	Hoja 1 de 1



SOLID EDGE ACADEMIC COPY

	<b>UNIVERSIDAD DE AMÉRICA</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECÁNICA	
	NOMBRE DEL PROYECTO: DESARROLLO DE LA INGENIERIA DE DETALLE PARA UN FBR PANEL PLANO	
	NOMBRE DEL PLANO: <b>A4 REFUERZO TANQUE</b>	
Considere una tolerancia de $\pm 0.1$ mm a no ser que se señale una distinta.	ELABORÓ: JOSEPH SEBASTIÁN VELANDIA BARÓN DANIEL ALEJANDRO TORRES BUSTOS	FECHA: 20/11/2018
Escala 1:10	N° Pieza 03	Hoja 1 de 1



SOLID EDGE ACADEMIC COPY

	<b>UNIVERSIDAD DE AMÉRICA</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> <i>DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECÁNICA</i>	
	NOMBRE DEL PROYECTO: <i>DESARROLLO DE LA INGENIERIA DE DETALLE PARA UN FBR PANEL PLANO</i>	
Considere una tolerancia de ±0.1 mm a no ser que se señale una distinta.	A4	NOMBRE DEL PLANO: <b>ANGULO SOLDADO</b>
	ELABORÓ: JOSEPH SEBASTIÁN VELANDIA BARÓN DANIEL ALEJANDRO TORRES BUSTOS	FECHA: 20/11/2018
	Escala 2:1	Nº Pieza 06
		Hoja 1 de 1

**ANEXO H.  
CALCULO DE SOLDADURAS**

Para el cálculo de las soldaduras, se siguió el proceso estipulado en el libro de Diseño de máquinas de Robert L. Norton, 4ta edición.

$\tau = P/A$	<b>A=Garganta*Longitud. Soldadura</b>
P=Carga	<b><math>\tau_{\text{permisible}} = 0.3 * R</math>. Tensión electrodo</b>
A=Área de la soldadura	

Vol. Fluido (L)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )		
0.03	1000	30	kg
Long. Tot. Ángulos (m)	Peso por metro (kg/m)		
8.42	0.88	7.4096	kg

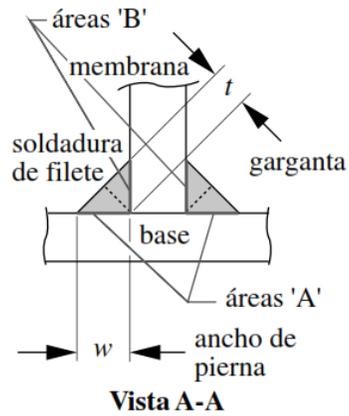
Dimensiones para las placas de acrílico (cm)			Volumen	
101.2	60.6	0.6	7359.264	cm <sup>3</sup>
60.6	6.2	0.6	450.864	cm <sup>3</sup>
101.2	6.2	0.6	752.928	cm <sup>3</sup>
101	45	0.5	2272.5	cm <sup>3</sup>
Total			10835.556	cm <sup>3</sup>

Volumen acrílico (cm <sup>3</sup> )	Densidad Acrílico (g/cm <sup>3</sup> )		
10835.556	1.2	13.0026672	kg

Peso total	50.4122672	kg
Peso + %seguridad	55.4534939	kg
Fuerza	543.998775	N

permisible	124.105664	MPa
Garganta	3	mm
A	49.86	mm <sup>2</sup>
$\tau$	10.910525	MPa
w	4.24264069	mm
	3	mm
F. seguridad	13.2211787	

Cortante /tensión	0.577	
Angulo filete	45	
Densidad Acrílico	1.2	g/cm <sup>3</sup>
% de seguridad	10	
Gravedad	9.81	m/s <sup>2</sup>
Longitud filete	16.62	mm
Acero	A36	
R. Tensión	250	MPa
Electrodo	E60	
Resistencia Electrodo	60	kpsi
	413.685545	MPa



**Tabla 12-3**

Resistencias mínimas de algunos aceros estructurales ASTM

Número ASTM	$S_y$ kpsi (MPa)	$S_{ut}$ kpsi (MPa)
A36	36 (250)	58-80 (400-500)
A572 Gr42	42 (290)	60 (415)
A572 Gr50	50 (345)	65 (450)
A514	100 (690)	120 (828)

**Tabla 12-2**

Tamaños mínimos de soldadura en filetes\*

Esesor del metal base (T)	Tamaño mínimo de la soldadura
tamaño en pulgadas	
$T \leq 1/4$	1/8
$1/4 < T \leq 1/2$	3/16
$1/2 < T \leq 3/4$	1/4
$3/4 < T$	5/16
tamaños en mm	
$T \leq 6$	3
$6 < T \leq 12$	5
$12 < T \leq 20$	6
$20 < T$	8

\* Fuente: tabla 5.8 AWS D1.1

**Tabla 12-1 Factores de seguridad contra falla estática cuando se utiliza la ecuación 12.1<sup>[6]</sup>**

Como los reportó la Testing Engineers, Inc., 1968

Metal base	Clase del electrodo	Factores de seguridad cuando se aplica un esfuerzo en el área de la garganta igual a 0.3 de la resistencia a la tensión del electrodo			
		Soldaduras longitudinales		Soldaduras transversales	
		Promedio	Mínimo	Promedio	Mínimo
A36	E60xx	2.88	2.67	—	—
A441	E70xx	2.95	2.67	4.62	4.06
A514	E110xx	2.41	2.21	3.48	3.30

## ANEXO I. ROTAMETROS

### G GAS PROPORTIONERS BACK PRESSURE COMPENSATED

#### BUILT-IN VALVES

Meters are available with built-in needle valves (CV™), high precision metering valves (MFV™) with “non-rising stems”, or with no valves.

The higher cost of MFV™ valves is justified whenever high sensitivity control and resolution are desirable particularly in conjunction with metering tubes of very low flow rates.

#### flow tubes

- ✓ Precision fabricated from heavy walled, shock resistant borosilicate glass.
- ✓ Bores are uniformly tapered or formed with internal “rib-guides” or flutes.
- ✓ Floats are retained by TFE plugs.
- ✓ Self cleaning.
- ✓ Low differential pressures that stay independent of flow rate changes.

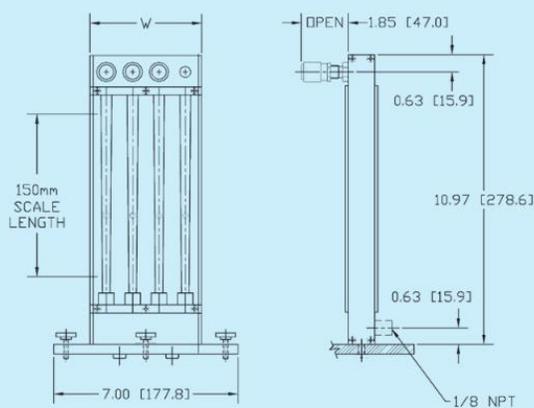
#### TYPICAL FLOW CAPACITIES AT 50 psig/3.5 BARS INLET PRESSURE

FLOWTUBE NUMBER	AIR [sml/min]	FLOWTUBE NUMBER	AIR [sml/min]
042-15G	83	092-04G	5528
032-41G	191	102-05G	9294
062-01G	324	034-39G	19767
112-02G	1086	044-40G	49374
082-03G	2008		

#### DIMENSIONS FOR G STYLE METERS

WIDTH (W)		
SCALE LENGTH	2 CHANNEL	3 CHANNEL
150mm	3.24	4.24

#### DIMENSIONS



#### SPECIFICATIONS STANDARD COMPONENT

<b>FLOW TUBE ACCURACY</b>	±2% of full scale reading, from 10 to 100% of scale. Conforming to ISA RP. 16-1.2.3. Specification 2-S-10.
<b>COMPONENT FLOW TUBE REPEATABILITY</b>	±0.25%. Typical calibration curves for air at 50 psig/3.5 bars using glass floats are available. Consult the company on the availability of calibration data for non-hazardous gases and special individual calibrations.
<b>MAX OPERATING PRESSURE</b>	200 psig/13.8 bars.
<b>MAX OPERATING TEMPERATURE</b>	250° F/121° C.

#### MATERIALS OF CONSTRUCTION

<b>FLOW TUBES</b>	Heavy walled borosilicate glass.
<b>CHOICE OF MOUNTING FITTINGS IN CONTACT WITH GASES</b>	a) Aluminum, black anodized. b) 316 stainless steel.
<b>SIDE PANELS</b>	Aluminum, black anodized.
<b>FRONT SHIELD</b>	Clear polycarbonate.
<b>BACK PLATE</b>	1/8" thick white acrylics.
<b>O-RINGS AND PACKING</b>	Buna-N® o-rings in aluminum model. Viton-A® o-rings in stainless steel meters. <b>OPTIONAL</b> Viton®, PTFE/Kalrez®.
<b>CONNECTIONS</b>	1/8" NPT female inlet and outlet connections.
<b>OPTIONAL</b>	Hose and compression fittings are available.

Bench mounting acrylic tripod bases are optional.

**Ordering information see page 22.**

21 WWW.AALBORG.COM - E-MAIL : INFO@AALBORG.COM - PHONE ☎ 845.770.3000 - TOLL FREE IN U.S.A. AND CANADA 1.800.866.3837 - ORANGEBURG N.Y. U.S.A.

# TECHNICAL INFORMATION

## TABLE OF STANDARD FLOW CAPACITIES

TABLE 9-65mm FLOW TUBES, GAS FLOW CAPACITIES OF ROUTINE GASES												
FLOW TUBE MAXIMUM FLOW RATES												
FLOW TUBE NUMBER	ARGON		CARBON DIOXIDE		HELIUM		HYDROGEN		NITROGEN		OXYGEN	
	[sml/min]	[scfh]	[sml/min]	[scfh]	[sml/min]	[scfh]	[sml/min]	[scfh]	[sml/min]	[scfh]	[sml/min]	[scfh]
042-07-GL	4	0.01	6.5	0.01	5.5	0.01	9.6	0.02	5.6	0.01	5	0.01
042-07-SA	7.7	0.02	10	0.02	8	0.02	15.3	0.03	8.5	0.02	7	0.01
042-07-ST	14	0.03	20	0.04	16	0.03	32.3	0.07	18	0.04	15	0.03
042-07-CA	28	0.06	39	0.08	30	0.06	53.6	0.11	34	0.07	29	0.06
042-07-TA	29	0.06	40	0.08	32	0.07	64.8	0.14	34	0.07	30	0.06
032-15-GL	38	0.08	59	0.13	47	0.10	100	0.21	51	0.11	46	0.10
032-15-SA	63	0.13	90	0.19	71	0.15	150	0.32	78	0.17	72	0.15
032-15-ST	122	0.26	160	0.34	146	0.31	314	0.67	149	0.32	132	0.28
032-15-CA	214	0.45	263	0.56	274	0.58	593	1.26	264	0.56	239	0.51
032-15-TA	224	0.47	279	0.59	294	0.62	654	1.39	276	0.58	248	0.53
022-13-GL	86	0.18	122	0.26	99	0.21	284	0.60	113	0.24	94	0.20
022-13-SA	131	0.28	181	0.38	157	0.33	435	0.92	167	0.35	147	0.31
022-13-ST	246	0.52	310	0.66	313	0.66	700	1.75	312	0.66	268	0.57
022-13-CA	420	0.89	494	1.05	604	1.28	1500	3.18	524	1.11	456	0.97
022-13-TA	446	0.94	519	1.10	632	1.34	1553	3.29	563	1.19	486	1.03
012-10-GL	174	0.37	221	0.47	211	0.45	502	1.06	215	0.46	189	0.40
012-10-SA	257	0.54	307	0.65	327	0.69	788	1.67	312	0.66	279	0.59
012-10-ST	429	0.91	489	1.04	636	1.35	1488	3.15	530	1.12	480	1.02
012-10-CA	685	1.45	735	1.56	1185	2.51	2455	5.20	838	1.78	761	1.61
012-10-TA	724	1.53	775	1.64	1300	2.75	2728	5.78	877	1.86	800	1.69
052-01-GL	829	1.76	883	1.87	1903	4.03	3212	6.82	1015	2.15	970	2.06
052-01-SA	1095	2.32	1143	2.42	2606	5.52	4215	8.93	1321	2.80	1217	2.58
052-01-ST	1645	3.49	1699	3.60	4128	8.75	6598	13.98	1983	4.20	1842	3.90
052-01-CA	2415	5.12	2438	5.17	6175	13.08	9450	20.02	2900	6.14	2676	5.67
052-01-TA	2559	5.42	2587	5.48	6588	13.96	10332	21.89	3063	6.49	2837	6.01
023-92-GL	1065	2.26	1110	2.35	1990	4.22	3923	8.31	1293	2.74	1165	2.47
023-92-SA	1395	2.96	1500	3.18	2950	6.25	5258	11.14	1710	3.62	1575	3.34
023-92-ST	2124	4.50	2190	4.64	4970	10.53	8602	18.22	2610	5.53	2360	5.00
023-92-CA	3125	6.62	3210	6.80	7675	16.26	12850	27.22	3820	8.09	3485	7.38
013-88-GL	1784	3.78	1794	3.80	3470	7.35	6359	13.47	2091	4.43	1928	4.08
013-88-SA	2279	4.83	2314	4.90	4932	10.45	9130	19.34	2859	6.06	2522	5.34
013-88-ST	3388	7.18	3449	7.31	8699	18.43	13600	28.81	4097	8.68	3761	7.97
013-88-CA	4904	10.39	4937	10.46	13227	28.02	19682	41.70	5928	12.56	5380	11.40
365-02-GL	2171	4.60	2237	4.74	4853	10.28	9410	19.94	2624	5.56	2323	4.92
365-02-ST	4172	8.84	4225	8.95	10947	23.19	16857	38.06	5026	10.65	4733	10.03
014-96-GL	5290	11.21	5470	11.59	13750	29.13	21712	46.00	6380	13.52	5880	12.54
014-96-SA	6900	14.62	6980	14.79	18500	39.19	28211	59.77	8280	17.54	7640	16.19
014-96-ST	10175	21.56	10150	21.50	27300	57.84	42040	89.07	12200	25.85	11250	23.83
014-96-CA	14150	29.98	14200	30.08	39500	83.69	58498	123.9	17050	36.12	15875	33.63
014-96-TA	15300	32.42	15050	31.89	41400	87.71	63804	135.1	18250	38.67	16700	35.38
054-17-GL	11125	23.57	11156	23.64	29762	63.1	47100	99.8	13412	28.42	12341	26.15
054-17-SA	14389	30.49	14256	30.20	38731	82.1	61715	130.7	17351	36.76	16047	34.00
054-17-ST	21116	44.74	20798	44.06	58472	123.8	90323	191.3	25311	53.63	23322	49.41
054-17-CA	30126	63.83	29156	61.77	84632	179.3	130805	277.1	35830	75.91	33287	70.52
054-17-TA	31622	67.00	31126	65.94	88862	188.2	139224	294.9	37724	79.92	35738	75.72
064-63-GL	19817	42.0	19379	41.1	51380	108.8	80752	171.0	23506	49.80	21686	45.9
064-63-SA	24597	52.1	24630	52.2	67754	143.5	106000	224.5	30337	64.27	27901	59.1
064-63-ST	37441	79.3	35100	74.4	104600	221.6	154750	327.8	43487	92.13	40053	84.9
064-63-CA	50200	106.3	47950	101.5	148114	313.8	220500	467.1	60618	128.4	55539	117.6
064-63-TA	52850	111.9	53200	112.7	156500	331.5	222300	470.9	64051	135.7	58300	123.5

**ANEXO J.  
COSTOS INSTRUMENTACION**

<b>Item</b>	<b>Valor Unitario</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor total</b>
<b>Cinta LED RGB (5 mts) + Control + Adaptador 12V</b>	45.000	1	45.000
<b>Arduino MEGA 2560</b>	36.000	1	36000
<b>Sonda Con Sensor De Temperatura Ds18b20 Sumergible (1m)</b>	6.300	1	6.300
<b>SENSOR DETECTOR PH MODULO + SONDA ELECTRODO PH0-14</b>	90.000	1	90.000
<b>Sensor De Luz Gy 302 - Bh1750 Arduino</b>	13.000	13	169.000
<b>Eheim Jager Acuario Termostato Calentador 25w</b>	152.650	1	152.650
<b>Rotametro (incluye costo importación 50%)</b>	930.000	2	1'860.000
	<b>COSTO TOTAL</b>		<b>2'358.950</b>