

**EFFECTO DE LOS ELECTRODOS TIPO MALLA EN LA HIDRODINÁMICA DE  
UN REACTOR FOTOELECTROQUÍMICO TUBULAR MEDIANTE DINÁMICA DE  
FLUIDOS COMPUTACIONAL**

**TANIA ISABEL GARCÍA MANZANO  
JORDAN RUBÉN GÓMEZ CALDERÓN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2018**

**EFFECTO DE LOS ELECTRODOS TIPO MALLA EN LA HIDRODINÁMICA DE  
UN REACTOR FOTOELECTROQUÍMICO TUBULAR MEDIANTE DINÁMICA DE  
FLUIDOS COMPUTACIONAL**

**TANIA ISABEL GARCÍA MANZANO  
JORDAN RUBÉN GÓMEZ CALDERÓN**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de  
Ingeniero Químico**

**Director**

**Prof. Julio Andrés Pedraza Avella  
Ing. Químico, Dr.**

**Co-Director**

**Prof. Arlex Chaves Guerrero  
Ing. Químico, Ph.D.  
María Inés Jaramillo Gutiérrez  
Ing. Química, M.Sc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2018**

*A Dios, por su luz, su bendición y hacer posible un logro más en mi vida.*

*A Isidro y Emilce, mis papis, por su amor infinito, por su entrega diaria, por enseñarme que con dedicación y pasión todo se puede alcanzar, por hacer de mis proyectos algo propio. Gracias por creer en mí más que yo, este logro es para ustedes*

*A Jesús Daniel, mi hermano, por su amor, admiración y compañía. El querer ser su mejor ejemplo, lo han convertido en mi mayor fuente de inspiración.*

*A mis abuelos, tíos, primos y demás familiares, por su afecto, apoyo y estar siempre orgullosos de mí.*

*A Jordan, mi compañero de tesis y gran amigo, por darle sentido a la palabra lealtad, por los momentos vividos, por nunca rendirnos y lograr este triunfo juntos.*

*A Pao, Angie “Colega”, Samuel, Javier y Thera, mis amigos, por estar para mí desde el primer hasta el último día. Me llevo los mejores recuerdos de universidad a su lado.*

*A Oscar “Campe”, Edwin y Angie Revuelta, por ser mis compañeros de lucha durante estos años, por su colaboración y tiempo compartido.*

*A Angie, mi eterna amiga, porque la distancia no ha sido impedimento para que su cariño y entusiasmo estén presentes en mi vida.*

*A mí, por cumplirme.*

***Tania Isabel García Manzano***

*A Dios, por iluminar mi camino, brindarme salud, fortaleza y sabiduría para cumplir mis metas.*

*A mis padres, mis principales y primeros profesores, por guiarme en la vida para crecer como persona, darme la oportunidad de ser profesional, y creer en mí en todo momento.*

*A mis hermanos, por apoyarme en mis sueños y estar siempre a mi lado cuando más los he necesitado, y enseñarme que todo es posible con esfuerzo y dedicación.*

*A la Universidad Industrial de Santander, por ser mi segundo hogar, por brindarme las herramientas para ser una gran persona y profesional para el mundo.*

*A mis amigos de la Universidad, Tania García, Ingrid Rojas, Anggie Revuelta, Oscar Galvis, Oscar Theran, Edwin Lizarazo, Andrés Arias, entre otros, por siempre brindarme la mano de una u otra forma y por los buenos momentos vividos... ¡Muchas Gracias!*

*A la familia García Manzano, porque su confianza e inmensa ayuda brindada para culminar satisfactoriamente mi pasantía de investigación.*

*Ya todos aquellos que han influenciado en la persona que soy... Gracias.*

***Jordan Rubén Gómez Calderón.***

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestra alma mater la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, a la ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA, a todos sus profesores y administrativos porque sus enseñanzas y afecto nos permitieron formarnos personal y profesionalmente.

Al GIMBA y al LABORATORIO DE FENÓMENOS INTERFACIALES REOLOGÍA, por proporcionar el equipo necesario para la realización de este trabajo.

A nuestro director el Profesor JULIO ANDRÉS PEDRAZA, por colocar su confianza en nosotros desde el primer momento que nos conocimos; sus consejos y oportunidades fueron muy valiosos a lo largo de toda nuestra vida universitaria.

A nuestro co-director el Profesor ARLEX CHAVES, por tener siempre un espacio para nosotros, por sus recomendaciones llenas de tranquilidad y fe en los momentos que más los necesitamos y por creer en nosotros facilitando la pasantía.

A nuestra co-directora MARÍA INÉS JARAMILLO, porque su dedicación, apoyo, amabilidad y compromiso la llevo a convertirse en una compañera durante este proyecto.

Al Doctor CARLOS RINALDI, por permitirnos realizar la pasantía en su prestigioso laboratorio en University of Florida (UF); y brindarnos sus conocimientos en esta técnica.

Al Ingeniero ZHIYUAN ZHAO, pues su tiempo y guía fueron fundamentales para el desarrollar satisfactoriamente nuestra estancia en UF.

A todas las personas que de una u otra forma contribuyeron para que lográramos culminar esta gran carrera.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>pág.</b>
INTRODUCCIÓN	18
1. METODOLOGÍA	26
1.1 RECONOCIMIENTO DEL SOFTWARE	26
1.2 SIMULACIÓN DEL REACTOR SIN Y CON ELECTRODOS	27
1.3 EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL REACTOR POR UDV	33
2. RESULTADOS Y ANÁLISIS	35
2.1 VALIDACIÓN DEL MALLADO	35
2.2 ANÁLISIS HIDRODINÁMICO DEL REACTOR UIS-GIMBA 2.1	37
2.3 ALTERNATIVA DE DISEÑO PARA LA HIDRODINÁMICA DEL REACTOR UIS-GIMBA 2.1	45
3. CONCLUSIONES	51
4. RECOMENDACIONES	52
BIBLIOGRAFÍA	53
ANEXOS	57

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. Discretización del dominio. ....	21
Figura 2. Flujo laminar y flujo turbulento. ....	23
Figura 3. Modelos de turbulencia. ....	24
Figura 4. Diagrama global de la metodología. ....	26
Figura 5. Geometría general del reactor UIS-GIMBA 2.1. ....	28
Figura 6. Geometría de la zona 2 a) sin electrodos y b) con electrodos. ....	28
Figura 7. Dominio del fluido en ANSYS a) sin electrodos y b) con electrodos. ....	29
Figura 8. Mallado con a) hexaedros 1000 elementos y b) tetraedros 6994 elementos. ....	30
Figura 9. Mallado del fluido. ....	30
Figura 10. Refinado del mallado (Ley de pared). ....	31
Figura 11. Velocidad a lo largo del reactor sin electrodos a $3,15 \times 10^{-4}$ [m <sup>3</sup> /s]. ....	35
Figura 12. Velocidad en función del número de elementos de la malla para un flujo volumétrico de $3,15 \times 10^{-4}$ [m <sup>3</sup> /s] en el reactor sin electrodos. ....	36
Figura 13. Velocidad a lo largo del reactor con electrodos a $3,15 \times 10^{-4}$ [m <sup>3</sup> /s]. ....	36
Figura 14. Velocidad en función del número de elementos de la malla para un flujo volumétrico de $3,15 \times 10^{-4}$ [m <sup>3</sup> /s] en el reactor con electrodos. ....	37
Figura 15. Posiciones para la toma de los perfiles de velocidad en el reactor UIS-GIMBA 2.1. ....	38
Figura 16. Perfiles de velocidad en el reactor UIS-GIMBA 2.1 sin electrodos a a) 0,224 [m] y b) 0,267 [m]. ....	38

Figura 17. Cabezales del reactor UIS-GIMBA 2.1 a) cabezal de entrada y b) cabezal de salida. ....	40
Figura 18. Perfiles de velocidad en el reactor UIS-GIMBA 2.1 sin electrodos a lo largo de a) la trayectoria del haz ultrasónico y b) el radio. ....	41
Figura 19. Perfiles de velocidad en el reactor UIS-GIMBA 2.1 con electrodos a a) 0,224 [m] y b) 0,267 [m]. ....	42
Figura 20. Perfiles de intensidad de turbulencia en el reactor UIS-GIMBA 2.1 sin y con electrodos a a) 0,224 [m] y b) 0,267 [m]. ....	44
Figura 21. Perfiles de velocidad en el reactor UIS-GIMBA 2.2 sin electrodos a a) 0,363 [m] y b) 0,409 [m]. ....	46
Figura 22. Perfiles de velocidad en el reactor UIS-GIMBA 2.2 con electrodos a a) 0,363 [m] y b) 0,409 [m]. ....	48
Figura 23. Perfiles de intensidad de turbulencia en el reactor UIS-GIMBA 2.2 sin y con electrodos a a) 0,363 [m] y b) 0,409 [m]. ....	49

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla 1. Características del ordenador.....	33
Tabla 2. Condiciones de frontera aplicadas al sistema.....	33

## LISTA DE ANEXOS

	<b>pág.</b>
Anexo A Ecuaciones de Navier Stokes.....	57
Anexo B Resumen de modelos de turbulencia de la familia RANS. ....	62
Anexo C Planos del reactor UIS-GIMBA 2.1.....	63
Anexo D Características y dimensiones de los electrodos. ....	65
Anexo E Modelo de turbulencia: Reynolds Stress Models (RSM). ....	66
Anexo F Esquema del montaje experimental. ....	70
Anexo G Planos del reactor UIS-GIMBA 2.2 .....	71

## NOMENCLATURA

$D$	<i>Diámetro [m]</i>
$d_{ij}$	<i>Difusión molecular por transporte turbulento [m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>]</i>
$g$	<i>Gravedad [m/s<sup>2</sup>]</i>
$I$	<i>Intensidad de turbulencia</i>
$L$	<i>Longitud [m]</i>
máx	<i>Valor máximo</i>
mín	<i>Valor mínimo</i>
$P'$	<i>Presión dinámica o modificada [Pa]</i>
$P_{ij}$	<i>Tasa de generación de las tensiones turbulentas por cizalla media [m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>]</i>
$Re$	<i>Número adimensional de Reynolds</i>
$t$	<i>Tiempo [s]</i>
$U$	<i>Velocidad media [m/s]</i>
$u'$	<i>Magnitud de las fluctuaciones de velocidad [m/s]</i>
$v$	<i>Velocidad [m/s]</i>
$\vec{V}$	<i>Vector velocidad [m/s]</i>
$\dot{V}$	<i>Flujo volumétrico o caudal [m<sup>3</sup>/s]</i>
$v_{us}$	<i>Velocidad medida en dirección del haz ultrasónico [m/s]</i>
$v_{real}$	<i>Velocidad axial [m/s]</i>

### Superíndices

' (prima)	<i>Variable modificada</i>
→ (flecha)	<i>Cantidad vectorial</i>

### Letras griegas

$\delta_{ij}$	<i>Matriz identidad</i>
$\varepsilon$	<i>Disipación de energía turbulenta [m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>]</i>

$\varepsilon_{ij}$	<i>Disipación viscosa o tasa de disipación de tensiones turbulentas [m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>]</i>
$\kappa$	<i>Energía cinética turbulenta [m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>]</i>
$\rho$	<i>Densidad [kg/m<sup>3</sup>]</i>
$\rho g$	<i>Fuerza externa sobre el fluido por unidad de volumen [N/m<sup>3</sup>]</i>
$\tau$	<i>Tensor de densidad de flujo de cantidad de movimiento viscoso [N/m<sup>2</sup>]</i>
$\tau_{ij,turbulento}$	<i>Tensor de esfuerzo específico de Reynolds [N/m<sup>3</sup>]</i>
$\nu$	<i>Viscosidad cinemática [m<sup>2</sup>/s]</i>
$\nu_t$	<i>Viscosidad cinemática turbulenta [m<sup>2</sup>/s]</i>
$\phi$	<i>Densidad de flujo de cantidad de movimiento</i>

## RESUMEN

**TÍTULO:** EFECTO DE LOS ELECTRODOS TIPO MALLA EN LA HIDRODINÁMICA DE UN REACTOR FOTOELECTROQUÍMICO TUBULAR MEDIANTE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL\*

**AUTORES:** TANIA ISABEL GARCÍA MANZANO, JORDAN RUBÉN GÓMEZ CALDERÓN\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Electrodo, Hidrodinámica, Fotoelectroquímico, Dinámica de Fluidos Computacional, ANSYS, Velocimetría Ultrasónica Doppler, Medición no intrusiva.

**DESCRIPCIÓN:** El Grupo de Investigación en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente (GIMBA) de la Universidad Industrial de Santander (UIS), viene trabajando en la creación de un modelo matemático que describa la degradación de los químicos contaminantes de aguas de producción y la generación de hidrógeno en un reactor fotoelectroquímico; para lograr esto es importante conocer su comportamiento hidrodinámico, pues será fundamental para describir la cinética de las reacciones involucradas y/o el transporte de especies químicas.

Por ello, en este trabajo se evaluó el efecto de los electrodos tipo malla (soportadores del catalizador) en la hidrodinámica del reactor UIS-GIMA 2.1 mediante dinámica de fluidos computacionales (CFD, Computational Fluid Dynamics) haciendo uso del software ANSYS 15.0; también se analizó la influencia de la velocidad de entrada en el comportamiento del flujo sin y con mallas a tres caudales diferentes  $1,26 \times 10^{-4}$ ;  $2,52 \times 10^{-4}$  y  $3,15 \times 10^{-4}$  [m<sup>3</sup>/s], los cuales posteriormente se midieron mediante la técnica de Velocimetría Ultrasónica Doppler (UDV, Ultrasonic Doppler Velocimetry), y se determinó que el fluido presentaba un comportamiento asimétrico y zonas de estancamiento a la salida del reactor.

Por lo tanto, con el fin de eliminar estas alteraciones en el flujo, se realizaron modificaciones en el diseño del equipo, logrando disminuir significativamente la asimetría de este al incrementar la longitud del cuerpo, a su vez se encontró que los electrodos son promotores de turbulencia cuando la relación entre la longitud y el diámetro del reactor es menor a 5.

---

\*Trabajo de grado

\*\* Facultad de ingenierías Físico Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Julio Andrés Pedraza Avella, Ingeniero Químico, Doctor en Química. Co-directores: Arlex Chaves Guerrero, Ingeniero Químico, Ph.D. María Inés Jaramillo Gutiérrez, Ingeniera Química, M.Sc.

## ABSTRACT

**TITLE:** EFFECT OF MESH-TYPE ELECTRODES IN THE HYDRODYNAMICS OF A TUBULAR PHOTOELECTROCHEMICAL REACTOR THROUGH COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS \*

**AUTHORS:** TANIA ISABEL GARCÍA MANZANO, JORDAN RUBÉN GÓMEZ CALDERÓN \*\*

**KEYWORDS:** Electrode, Hidrodinamic, Photoelectrochemical, Computational Fluid Dynamics, ANSYS Fluent, Ultrasonic Doppler Velocimetry, Non-intrusive measurement.

**DESCRIPTION:** The Research Group in Minerals Biohydrometallurgy and Environment (GIMBA, Acronym in Spanish) from Universidad Industrial de Santander (UIS), has been working on the creation of a mathematical model that describes the degradation of chemical contaminants in production waters and the generation of hydrogen in a photoelectrochemical reactor; To achieve this it is important to know its hydrodynamic behavior, since it will be fundamental to describe the kinetics of the reactions involved and / or the transport of chemical species.

Therefore, in this work we evaluated the effect of mesh-type electrodes (catalyst supporters) on the hydrodynamics of the UIS-GIMA 2.1 reactor using fluid dynamics computations (CFD, Computational Fluid Dynamics) using the ANSYS 15.0 software; was also analyzed the influence of the input velocity on the behavior of the flow without and with meshes at three different flows  $1,26 \times 10^{-4}$ ,  $2,52 \times 10^{-4}$ ,  $3,15 \times 10^{-4}$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]; and, which were subsequently measured using the Ultrasonic Doppler Velocimetry (UDV, Ultrasonic Doppler Velocimetry) technique, and it was determined that the fluid exhibited asymmetric behavior and stagnation zones. The output of the reactor.

Therefore, in order to eliminate these alterations in the flow, modifications were made in the design of the equipment, managing to significantly decrease the asymmetry of this by increasing the length of the body, in turn it was found that the electrodes are turbulence promoters when the ratio between the length and diameter of the reactor is less than 5.

---

\*Bachelor thesis

\*\* Facultad de ingenierías Físico Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Julio Andrés Pedraza Avella, Ingeniero Químico, Doctor en Química. Co-directores: Arlex Chaves Guerrero, Ingeniero Químico, Ph.D. María Inés Jaramillo Gutiérrez, Ingeniera Química, M.Sc.

## INTRODUCCIÓN

En el transcurso del año 2017 el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) reporta que alrededor del 1,6% de la demanda de agua en Colombia corresponde a la explotación de crudo; cifra que no es alarmante si se compara con la que emplea el sector agrícola y ganadero, que equivale a la mitad del consumo del agua del país<sup>1</sup>. Sin embargo, el problema respecto al consumo del agua en el sector petrolero es el daño que causa a las fuentes hídricas en medio del proceso de extracción, ya que es captada de los ríos y llevada a las profundidades de los pozos, en donde quedan atrapadas ocasionando que sea inasequible para los seres vivos<sup>2</sup>.

Adicionalmente el agua de producción tiene un pH entre 4 y 8 por la presencia de ácidos disueltos como el H<sub>2</sub>S (ácido sulfhídrico) y el CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), provocando un aumento en su corrosividad lo que ocasiona el deterioro de las tuberías por donde circula, por lo que sólo se puede reutilizar el 15% de ella<sup>3</sup>. Por este motivo implementar en nuevas tecnologías que ayuden a eliminar estos químicos es de gran ayuda para disminuir el impacto ambiental y ampliar la vida útil de los equipos y tuberías.

El Grupo de Investigación en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente (GIMBA) de la Universidad Industrial de Santander (UIS) ha estado interesado en investigar sobre diferentes técnicas para tratar este tipo de agua, por ello, ESPINOSA &

---

<sup>1</sup> ECOPETROL. Agua sí, petróleo también [En línea]. 2017. Recuperado en 2017-12-23. Disponible en: <http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ngenierí-web/nuestra-empresa/sala-de-prensa/noticias/noticias-2017/noticias-2017/agua-si-petroleo-tambien>

<sup>2</sup> CONTAGIORADIO. La radiografía del derecho fundamental al agua en Colombia [En línea] 2017. Recuperado 2017-12-23. Disponible en: <http://www.contagioradio.com/la-radiografia-del-derecho-fundamental-al-agua-colombia-articulo-38021/>

<sup>3</sup> GARCÍA, José. Análisis de agua de producción. [En línea]. 2015. Consultado 23 diciembre 2017]. Disponible en: [https://www.academia.edu/9254018/An%C3%A1lisis\\_de\\_agua\\_de\\_producci%C3%B3n](https://www.academia.edu/9254018/An%C3%A1lisis_de_agua_de_producci%C3%B3n)

MONSALVE<sup>4</sup>, LAITÓN & PUENTES<sup>5</sup> y CARDOZO<sup>6</sup> desarrollaron un reactor tubular (UIS-GIMBA 2.0) para evaluar la degradación fotoelectrocatalítica de surfactantes presentes en agua de producción de la industria petrolera, que posee electrodos tipo malla para soportar el catalizador usado en la oxidación de los compuestos no deseados.

Posteriormente, RUIZ & SANABRIA<sup>7</sup> propusieron modificaciones a este reactor con base en cálculos hechos mediante el software COMSOL Multiphysics ® 5.2 mejorando su hidrodinámica (disminución de zonas muertas, de recirculación y estancamiento) mediante el rediseño de los cabezales de entrada y salida (UIS-GIMBA 2.1). Sin embargo, este estudio se realizó para cuando el catalizador se encuentra en suspensión, es decir, sin tener en cuenta las mallas electrolíticas. Cabe resaltar, que este trabajo muestra la importancia de la hidrodinámica en el desempeño del reactor.

El GIMBA también trabaja en la creación de un modelo matemático que además de describir cómo es el fenómeno de degradación de los químicos contaminantes en aguas de producción en un reactor fotoelectrocatalítico tubular permite la producción de hidrógeno para futuras aplicaciones a nivel industrial: para lograr esto se debe conocer la cinética de las reacciones involucradas y/o el transporte de especies químicas. Sin embargo, es necesario evaluar el efecto de los electrodos tipo malla en el comportamiento hidrodinámico del reactor, debido a que se cree

---

<sup>4</sup> ESPINOSA ROJAS, Sneydy Sthefanie & MONSALVE OSORIO, Mónica Tatiana. Evaluación de la degradación de un surfactante aniónico empleado en el recobro químico del petróleo con S-TiO<sub>2</sub> en suspensión y luz visible en un fotorreactor tubular. Trabajo de grado Ingeniera química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería química, 2015, 18-46 p.

<sup>5</sup> LAITÓN ROZO, Nohelio Eduardo & PUENTES CORREA, Ludy Silvana. Evaluación de la degradación fotocatalítica de un surfactante aniónico presente en el agua de producción del petróleo usando S-TiO<sub>2</sub> soportado y luz visible en un fotorreactor tubular. Trabajo de grado Ingeniera química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería química, 2015, 19-51 p.

<sup>6</sup> CARDOZO GUALDRON, Juan Carlos. Evaluación de la estabilidad y fotoactividad de S-TiO<sub>2</sub> soportado sobre mallas metálicas para la degradación del surfactante Shell Enordet O242 presente en aguas de producción de petróleo utilizando un reactor tubular y luz visible. Trabajo de investigación Magíster en Ingeniería química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería química, 2016, 19-138 p.

<sup>7</sup> RUIZ LIZARAZO, Jeferson Owaldo & SANABRIA MEJÍA, Lineth Andrea. Estudio hidrodinámico de un reactor fotoelectroquímico tubular mediante dinámica de fluidos computacional. Trabajo de grado Ingeniera química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería química, 2016, 11-36 p.

que estos son promotores de turbulencia, condición que posibilita un contacto continuo entre el fluido y los electrodos beneficiando así la cinética de la reacción: dando origen así a la hipótesis principal de este proyecto de investigación.

Los ingenieros emplean dos alternativas fundamentales para el análisis de un problema: experimentación en el laboratorio y experimentación numérica (simulación). La experimentación en el laboratorio permite trabajar con la configuración real, sin embargo, involucra alto costo económico y muchas veces limitaciones en cuestiones de seguridad, disponibilidad de espacio, entre otros. La simulación, en términos de seguridad, tiene gran ventaja debido a que la persona no corre riesgos que atenten a su integridad, además, evita costo de reactivos, de instrumentación, etc.; pero su desventaja radica en que los resultados obtenidos no son reales sino aproximaciones, y en algunos casos para solucionar las ecuaciones se requiere la implementación de computadores de alta capacidad y rendimiento; en base a esto, la agrupación entre estas dos opciones, da como resultado proyectos de mejor calidad<sup>8</sup>. De este modo, la simulación estima condiciones y propiedades de los fluidos que se pueden validar mediante la experimentación.

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, Computational Fluid Dynamics) definida por muchos ingenieros en términos sencillos como el campo de estudio dedicado a solucionar ecuaciones del flujo de fluidos con computadoras<sup>9</sup>, es el área del conocimiento aplicada a la simulación numérica de flujos de fluidos, transferencia de calor y fenómenos relacionados tales como reacciones químicas, combustión, aeroacústica, entre otros. El CFD surge de la unión entre la mecánica de fluidos y el cálculo numérico, ya que emplea ecuaciones que rigen el transporte

---

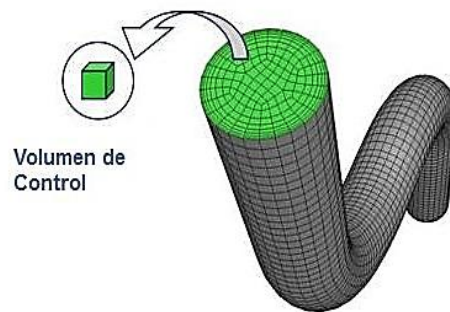
<sup>8</sup> PRIETO JIMÉNEZ, Natalia. Análisis del comportamiento fluidodinámico de la suspensión bagazo de caña de azúcar-agua en tubos con mezcladores estáticos. Trabajo de grado Ingeniería química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería química, 2008, 8-9 p.

<sup>9</sup> ÇENGEL, Yunus & CIMBALA, John. Mecánica de fluidos. 1 ed. México: McGraw-Hill, 2006. p. 818, 823-826, 841. ISBN 970-10-5612-4.

de los fluidos que tienen origen en la mecánica de fluidos y son resueltas mediante diversos métodos numéricos<sup>10</sup>.

Para aplicar estos métodos en el fluido a estudiar, se debe emplear previamente algún proceso de discretización, donde el más utilizado en CFD es el de volúmenes finitos, que consiste en dividir el dominio en pequeños elementos llamados celdas, como se puede observar en la Figura 1, y luego de discretizar el dominio en volúmenes, la ecuación algebraica es resuelta en cada uno de los elementos<sup>11</sup>.

**Figura 1. Discretización del dominio.**



Fuente: KESSLER, Martin. Dinámica de Fluidos Computacional: ¿Qué es? [En línea]. 2016. Recuperado en 2017-08-11. Disponible en: <http://www.esss.com.br/blog/es/2016/06/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/>

El CFD tiene diversas aplicaciones en la ingeniería, como lo son: analizar la aerodinámica y aerotermodinámica de vehículo; evaluar la refrigeración de equipamientos, como reactores nucleares, motores, entre otros; hacer estudios de caracterización de polución ambiental, simulación de poluentes y contaminantes en corrientes hídricas; y simular hidrodinámica y hemodinámica<sup>12</sup>.

---

<sup>10</sup> KESSLER, Martin. Dinámica de Fluidos Computacional: ¿Qué es? [En línea]. 2016. Recuperado en 2017-08-11. Disponible en: <http://www.esss.com.br/blog/es/2016/06/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/>

<sup>11</sup> RODRIGUEZ PESTAÑA, Claudia. Simulación numérica de la estela tras un cuerpo de base Roma a números de Reynolds altos: la influencia de los modelos de turbulencia. Trabajo de grado Ingeniería en Tecnologías Industriales. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos, 2015, 8-56 p.

<sup>12</sup> KESSLER, Martin. Op. cit.

Actualmente existen diversas herramientas (software) que ayudan a los ingenieros en el análisis de la fluidodinámica. Algunas de ellas son paquetes multifísicos, como es el caso de ANSYS, que combina la simulación de propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y fluido-mecánicas en una única interfaz, permitiendo desarrollar un proyecto completo, desde el diseño, la simulación hasta el análisis de los resultados<sup>13</sup>, siendo el preferido por muchos en los últimos años debido a que sus estimaciones son sumamente confiables, pudiéndose validar mediante la experimentación. Por lo tanto, se emplea este software en el actual estudio debido a su alto desempeño fluidodinámico.

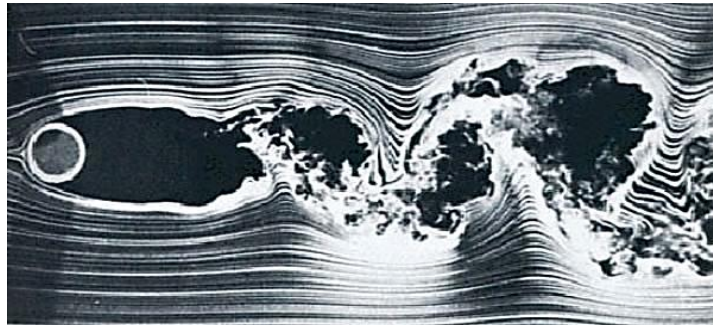
En la mecánica de fluidos existen principalmente dos regímenes de flujo: el laminar y el turbulento. El flujo laminar se caracteriza porque los esfuerzos viscosos son dominantes y por ello al aplicarle una perturbación, ésta se amortigua rápidamente; además, las partículas del fluido siguen una trayectoria definida. Mientras que, los fluidos bajo el régimen turbulento se caracterizan por ser irregulares y complejos, el movimiento de las partículas se define como desordenado o desorganizado, pues no siguen una trayectoria, sino describen movimientos aleatorios en forma de remolinos, como se muestra en la Figura 2; entender el proceso de los vórtices desde que se generan hasta que finalmente se disipan es un estudio clave. La turbulencia es un problema complejo que ha despertado el interés de varios ingenieros, matemáticos y físicos a lo largo de la historia, llevándolos a crear múltiples métodos numéricos y experimentales para estudiar este fenómeno, los cuales están en continuo cambio a medida que se avanza en su investigación<sup>14</sup>.

---

<sup>13</sup> KESSLER, Martin. Op. cit.

<sup>14</sup> RODRIGUEZ PESTAÑA, Claudia. Op. cit.

**Figura 2. Flujo laminar y flujo turbulento.**



Fuente: TEXTOS CIENTÍFICOS [Anónimo]. Aplicación del análisis dimensional: el número de Reynolds [En línea]. 2014. Recuperado en 2017-10-26. Disponible en: <https://www.textoscientificos.com/fisica/fluidos/numero-de-reynolds>

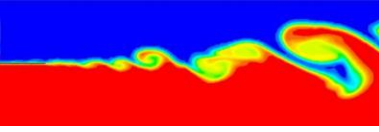
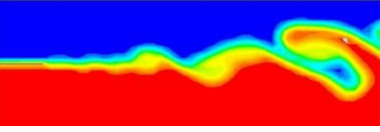
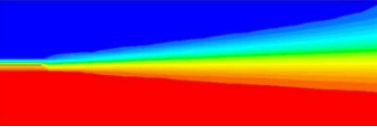
Debido a que el campo de estudio de la turbulencia es amplio, los flujos bajo este régimen tienen características diferentes, y el hecho de que aparezcan escalas muy diferentes imposibilita la aplicación directa de las ecuaciones de Navier-Stokes (Anexo A)<sup>15</sup>.

Ahora bien, los modelos de turbulencia se pueden clasificar en tres grandes grupos como se muestra en la Figura 3, donde cada modelo cumple con una función en específico, lo cual depende del objetivo y el alcance del proyecto de investigación.

---

<sup>15</sup> RODRIGUEZ PESTAÑA, Claudia. Op. cit.

**Figura 3. Modelos de turbulencia.**

<p style="text-align: center;"><b>DNS</b> (Direct Numerical Simulation)</p>	<p style="text-align: center;"><b>LES</b> (Large Eddy Simulation)</p>	<p style="text-align: center;"><b>RANS</b> (Reynolds Average Navier-Stokes)</p>
		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Técnicamente puede resolver cada movimiento fluctuante en el flujo.</li> <li>• Sin embargo, la discretización debe ser muy fina y el lapso de tiempo (pasos de tiempo) muy pequeño.</li> <li>• Estas demandas aumentan con el número de Reynolds.</li> <li>• La realidad es que ésta es sola una herramienta de investigación para menores flujos de números de Reynolds restringidos a aplicaciones de supercomputación.</li> <li>• Es una herramienta de investigación solamente, demasiado información para aplicaciones industriales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En términos de demanda computacional, LES se encuentra entre DNS y RANS.</li> <li>• Al igual que DNS, se realiza una simulación en 3D a lo largo de muchos pasos.</li> <li>• Sin embargo, solo se resuelven los 'remolinos' más grandes.</li> <li>• La discretización puede ser más gruesa y más rápida que DNS.</li> <li>• Para su solución, también requiere de una super computadora.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esta es la herramienta principal utilizada por los ingenieros.</li> <li>• Las ecuaciones se resuelven por el comportamiento de flujo promediado en el tiempo y la magnitud de las fluctuaciones turbulentas.</li> <li>• Las soluciones de estado estable son posibles.</li> <li>• Este es el modelo más utilizado para flujos industriales.</li> </ul>

Fuente: Modificado de: EGGENSPIELER, Gilles. Turbulence Modeling [En línea]. 2011. Recuperado en 2017-08-11. Disponible en: <http://fluid.itcmp.pwr.wroc.pl/~pblasiak/CFD/UsefullInformation/turbulence-summary-4.pdf>

La familia RANS, está a su vez clasificada desde modelos que solo emplean una ecuación hasta modelos que usan seis ecuaciones, adicional a la de continuidad, estos se muestran en el Anexo B.

En este orden de ideas, el objetivo del trabajo fue evaluar el efecto de los electrodos tipo malla en la hidrodinámica del reactor tubular fotoelectroquímico UIS-GIMBA 2.1 mediante dinámica de fluidos computacionales (CFD) haciendo uso del software ANSYS y experimentación (UDV). Para ello, se evaluó la influencia de la velocidad de entrada en la hidrodinámica del reactor, en ausencia y presencia de los electrodos. Posteriormente los resultados numéricos obtenidos se compararon contra perfiles de velocidad experimentales obtenidos mediante la técnica de Velocimetría Ultrasónica Doppler (UDV, Ultrasonic Doppler Velocimetry), la cual de forma no intrusiva, utiliza un haz ultrasónico pulsado y la dispersión de ondas ultrasónicas en partículas trazadoras para obtener perfiles de velocidad instantáneos. El principio de funcionamiento del UDV es el cambio de la frecuencia

(efecto Doppler) del eco de las partículas trazadoras suspendidas en movimiento, a lo largo de la línea de medición (trayectoria del haz)<sup>16</sup>. Por eso, uno de los requisitos primordiales para que este método sea efectivo es que la cantidad de partículas suspendidas sea suficientemente grande<sup>17</sup>. Y finalmente en base a las evaluaciones anteriores, se proponen modificaciones en el diseño del reactor que conduzcan al mejoramiento de su hidrodinámica.

---

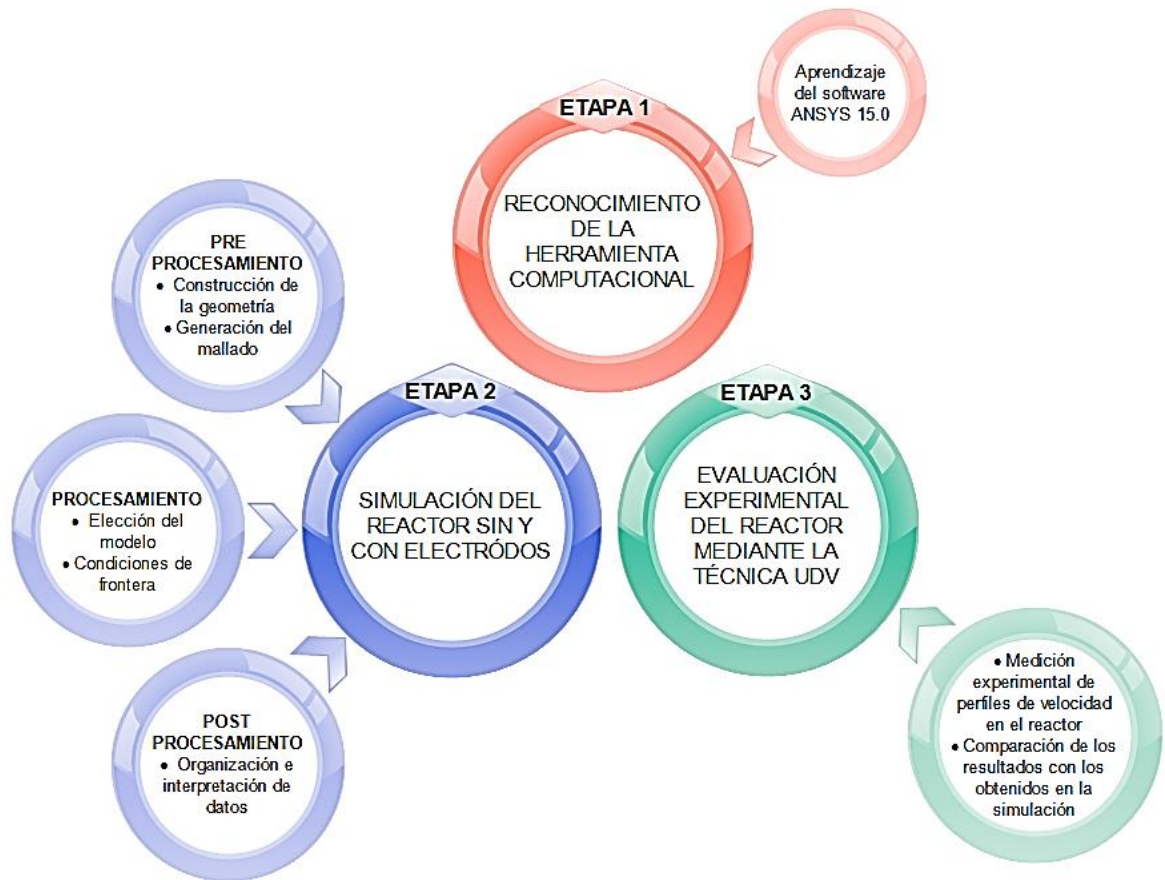
<sup>16</sup> TAKEDA, Yasushi. Ultrasonic Doppler Velocity Profile for Fluid Flow. Japón: Springer, 2012. p. 21. ISBN 978-4-431-54025-0.

<sup>17</sup> FRAGA, I., *et al.* Nonintrusive Method to Compute Water Discharge in Pipes with a Low Depth-to-Diameter Ratio Using Ultrasonic Doppler Velocimetry. Journal of Hydraulic Engineering. 2015, vol. 141, no. 3. ISSN 0733-9429.

# 1. METODOLOGÍA

Para cumplir con el objetivo general de este proyecto, se ejecutó la metodología representada en la Figura 4.

**Figura 4. Diagrama global de la metodología.**



## 1.1 RECONOCIMIENTO DEL SOFTWARE

En este proyecto se estudió el efecto de electrodos tipo malla en el comportamiento hidrodinámico del reactor tubular UIS GIMBA 2.1. Para esto se decidió simular el paso del fluido por el reactor antes y después de incorporar los electrodos mediante la herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD) ANSYS 15.0, la cual había sido adquirida previamente por el laboratorio de reología UIS.

## 1.2 SIMULACIÓN DEL REACTOR SIN Y CON ELECTRODOS

En esta etapa se desarrolló simultáneamente la simulación sin y con electrodos del reactor UIS-GIMBA 2.1, mediante las siguientes sub-etapas: pre procesamiento, procesamiento y post procesamiento.

La sub-etapa de pre procesamiento se dividió en dos partes: la representación geométrica del sistema físico y la creación de un mallado de elementos finitos de este. La geometría del reactor que se muestra en la Figura 5 fue creada en Desing Modeler componente de la plataforma de ANSYS Workbench y las medidas usadas corresponden a los planos ya existentes del equipo (los planos del reactor se muestran en el Anexo C). Se trabajó mediante el enfoque de modelado sólido que implica la creación de líneas, áreas o volúmenes y por ende proporciona una mayor potencia (a veces la única forma viable) para modelar volúmenes sólidos tridimensionales de geometría compleja<sup>18</sup>.

Para elaborar la geometría de los electrodos se usaron las especificaciones dadas por la empresa proveedora de cada una de las mallas las cuales habían sido adquiridas previamente por el GIMBA. Para la construcción del fotoánodo (malla externa) se utilizó la malla de titanio ASTM B265 SPEC suministrada por Soltech Ltda y para el fotocátodo (malla interna) la malla de acero 304 expandida en cold rolled IMT-10 comprada a Colmallas S.A (las características detalladas de las mallas electrolíticas se presentan en el Anexo D).

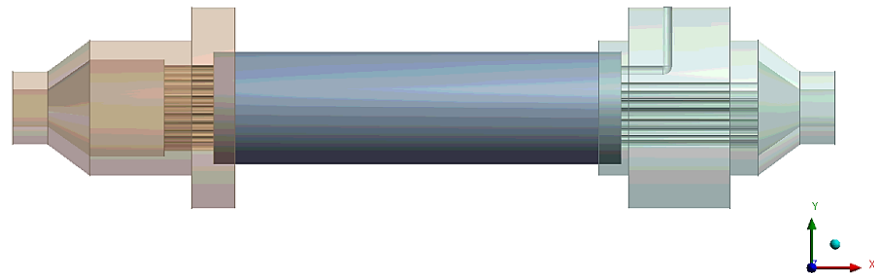
Se decidió hacer una división hipotética del reactor en: zona 1, zona 2 y zona 3; las cuales corresponden al distribuidor de flujo de entrada, cuerpo del reactor y el distribuidor de flujo de salida respectivamente; esto con dos fines: el primero facilitar

---

<sup>18</sup> MADENCI, Erdogan. & GUVEN, Ibrahim. The finite element method and applications in engineering using ansys. New York: Springer, 2006. p. 83, 160. ISBN 0-387-28289-0.

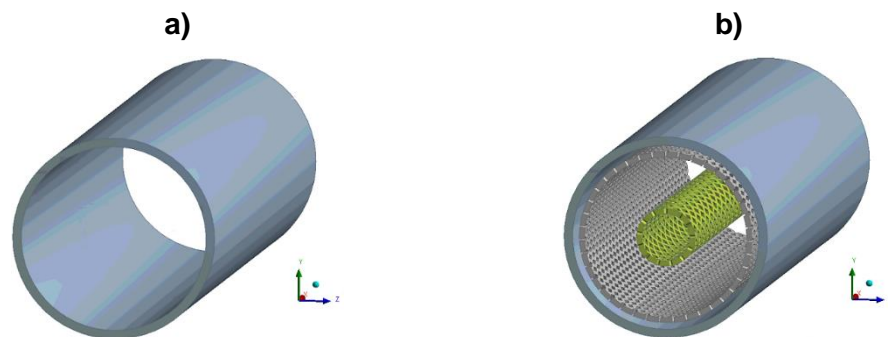
el análisis al interior del reactor y el segundo mostrar exactamente dónde están las diferencias en la geometría del reactor al tener o no los electrodos tipo malla.

**Figura 5. Geometría general del reactor UIS-GIMBA 2.1.**



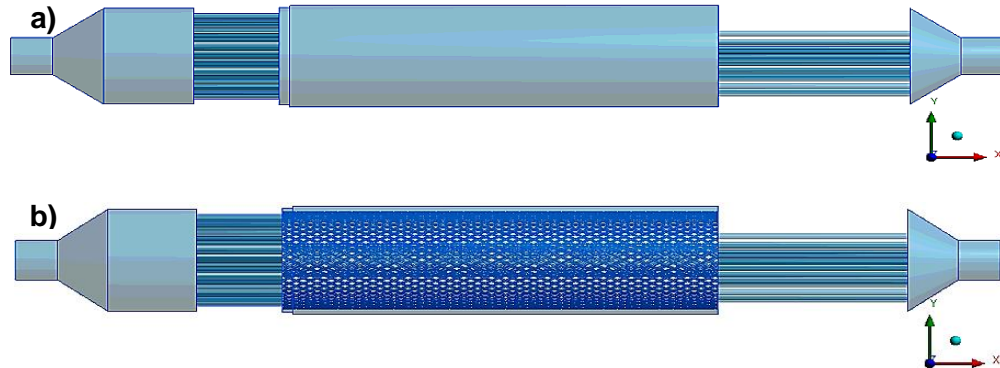
- **Zona 1. Distribuidor de flujo de entrada:** Región conformada por un cono unido a la sección transversal de un cilindro, precedido de 81 distribuidores que permite un flujo uniforme en dirección axial al reactor.
- **Zona 2. Cuerpo del reactor:** Es la sección donde se concentra el análisis de este caso, puesto que en ella ocurren las reacciones de interés y se ubican las mallas electrolíticas. Esta es la única sección que cambia cuando se crea la geometría, implementando o no los electrodos como se muestra en la Figura 6.
- **Zona 3. Distribuidor de flujo de salida:** Esta última zona, contiene 43 distribuidores que reciben el fluido que viene del reactor y lo dirigen a un cono que conecta con la tubería de salida.

**Figura 6. Geometría de la zona 2 a) sin electrodos y b) con electrodos.**



Lo que se usó como dominio de la simulación, es el volumen que ocupa el fluido dentro de esta geometría, tal como se muestra en la Figura 7.

**Figura 7. Dominio del fluido en ANSYS a) sin electrodos y b) con electrodos.**



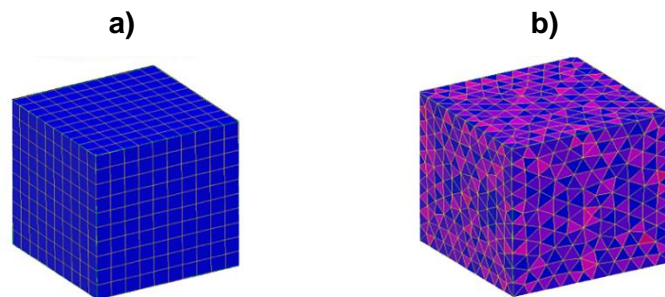
Una vez completado el modelo sólido, en otro componente de ANSYS Workbench llamado Meshing se generó el mallado. Este fue de tipo no estructurado, es decir, que las celdas no siguen ningún patrón en particular, lo cual ofrecen gran flexibilidad en el tratamiento de geometrías complejas como las de este trabajo. Los elementos que se usaron en el mallado no estructurado 3-D son una mezcla de tetraedros y hexaedros<sup>19</sup>; para reducir el tiempo de simulación se debe hacer el mallado evitando el uso de los tetraedros debido a que estos ocupan aproximadamente 7 veces menos volumen que los hexaedros, ocasionando que el número de celdas aumente como se muestra en la Figura 8, sin embargo, los tetraedros son capaces de generarse automáticamente independientemente de la complejidad del dominio, mientras que los hexaedros limitan su uso a lugares que representan un cuerpo geométrico definido (cilindros, conos, prismas, entre otros)<sup>20</sup>. Por lo tanto, los sitios donde ocurría un cambio abrupto de diámetro, es decir, en la transición desde los distribuidores de entrada hacia el cuerpo del reactor, y de este hacia los

<sup>19</sup> SÁNCHEZ VÁSQUEZ, Jesús. Simulación numérica directa en paralelo de las ecuaciones de Navier-Stokes en flujos con capa límite desprendida. Aplicaciones en instalaciones deportivas con gradas cubiertas. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Sevilla: Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingenieros, 2004, 56, 67-68 p.

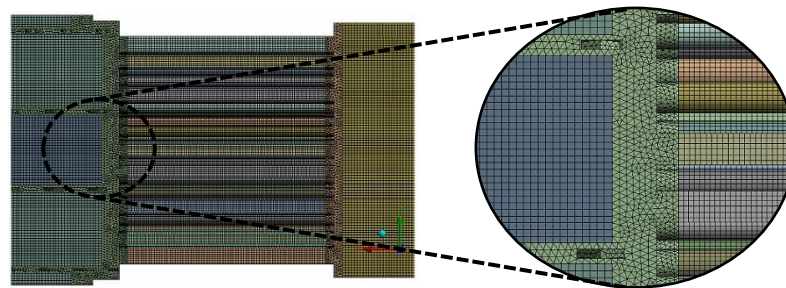
<sup>20</sup> Ibid.

distribuidores de salida, así como en las cercanías a las mallas electrolíticas (cuando fue necesario) se usó tetraedros y en el fluido restante hexaedros como se muestra en la Figura 9. Es preciso destacar que un mallado no estructurado es mejor que un mallado estructurado (sigue un patrón específico) en geometrías complejas.<sup>21</sup>

**Figura 8. Mallado con a) hexaedros 1000 elementos y b) tetraedros 6994 elementos.**



**Figura 9. Mallado del fluido.**



A continuación, se realizó el refinado que consistió en verificar la regularidad del mallado, es decir, que sea de buena calidad; para ello ANSYS cuenta con una serie de criterios de calidad de malla que se evalúan dependiendo del tipo de celda. En este caso, las secciones donde se emplearon hexaedros el indicador a calcular era el *Aspect Ratio* que se define en la ecuación (1) y su valor debía estar entre 1 y 5, mientras que en las zonas donde se usaban tetraedros el indicador calculado fue *Skweness* (ecuación 2) y su valor debía estar entre 0 y 0,85. Resaltando que un

<sup>21</sup> ÇENGEL, Yunus & CIMBALA, John. Op. cit.

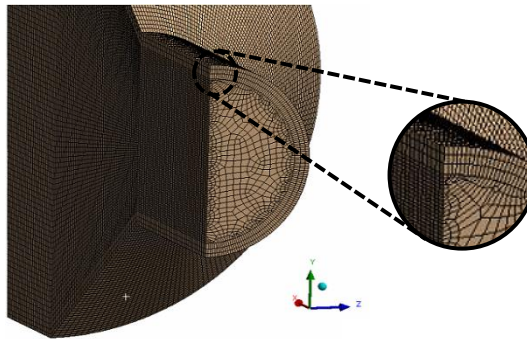
cuadrado tiene un Aspect Ratio de 1 y que un triángulo equilátero un Skewness de 0<sup>22</sup>.

$$\text{Aspect ratio} = \frac{\text{lado más largo}}{\text{lado más corto}} \quad (1)$$

$$\text{Skewness} = \text{máx} \left[ \frac{\theta_{\text{máx}} - \theta}{180 - \theta}, \frac{\theta - \theta_{\text{mín}}}{0} \right] \quad (2)$$

En la Figura 10 se presenta el refinado del mallado hecho cerca de las paredes, con el fin de que la solución de la capa límite de velocidad sea más precisa, ya que esta zona es de máxima influencia en los resultados que proporciona la simulación<sup>23</sup>. Por último, se comprobó que la resolución del mallado era el adecuado, es decir, que la solución fuese independiente de la malla<sup>24</sup>. El método que se usó para lograr esta independencia fue reducir el tamaño de la celda de manera paulatina (incrementando la resolución) hasta que se encontró un valor, para el cual la solución no cambia de manera considerable.

**Figura 10. Refinado del mallado (Ley de pared).**



En la sub-etapa de procesamiento se determinó, cómo y bajo qué condiciones se simularía el fluido, el cual fue agua a 23 [°C], cuya densidad y viscosidad a esta temperatura son 997,2 [kg/m<sup>3</sup>] y 9,33x10<sup>-4</sup> [Pa·s] respectivamente; los caudales seleccionados inicialmente fueron 1,26x10<sup>-4</sup>, 2,52x10<sup>-4</sup> y 3,78x10<sup>-4</sup> [m<sup>3</sup>/s] siguiendo

<sup>22</sup> ÇENGEL, Yunus & CIMBALA, John. Op. cit.

<sup>23</sup> GARCÍA VILLANUEVA, Amanda. Estudio CFD del flujo turbulento alrededor de álabes de turbomáquinas con modelo trans sst. Trabajo de grado Ingeniería Mecánica. Barcelona: Universitat Politécnica de Catalunya. Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona, 2015, 20 p.

<sup>24</sup> ÇENGEL, Yunus & CIMBALA, John. Op. cit.

la metodología de CARDOZO<sup>25</sup> y ESPINOSA & MONSALVE<sup>26</sup>, sin embargo condicionados por la capacidad de las bombas sólo fue posible trabajar a  $1,26 \times 10^{-4}$ ;  $2,52 \times 10^{-4}$  y  $3,15 \times 10^{-4}$  [m<sup>3</sup>/s] estos valores posicionan al flujo en un régimen turbulento. El modelado para este tipo de flujos presenta tres opciones: Simulación Numérica Directa (DNS, Direct Numerical Simulation), Simulación de Remolinos Grandes (LES, Large-Eddy Simulation) y las Ecuaciones de Navier-Stokes con el promedio de Reynolds. (RANS, Reynolds-Averaged Navier-Stokes), por tratarse de un flujo en estado estacionario, la simulación se realizó mediante el uso de RANS, ya que toma en cuenta el incremento de intensidad de mezclado y la difusión debido a los remolinos, además de ser el modelo más empleado a nivel industrial, requiere un menor costo computacional y permite evaluar variedad de diseños. Cuando se usa uno de estos modelos, la ecuación de Navier-Stokes (ecuación 3) se reemplaza por la ecuación (4)<sup>27</sup>.

$$(\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla})\vec{V} = -\frac{1}{\rho}\vec{\nabla}P' + \nu\nabla^2\vec{V} \quad (3)$$

$$(\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla})\vec{V} = -\frac{1}{\rho}\vec{\nabla}P' + \nu\nabla^2\vec{V} + \vec{\nabla} \cdot (\tau_{ij,turbulento}) \quad (4)$$

Para cerrar las ecuaciones RANS se optó por el modelo de segundo orden, Transporte de Esfuerzos de Reynolds (RSM, Reynolds Stress Model), el cual resuelve una ecuación de transporte separada para cada uno de los componentes del esfuerzo, así como una ecuación de transporte para la tasa de disipación escalar de turbulencias energía cinética<sup>28</sup>; debido a que es el más exacto de todos los modelos clásicos de turbulencia, permite un buen funcionamiento para flujos complejos y además el ordenador utilizado cubría su requerimiento computacional, sus características se muestran en Tabla 1. Las ecuaciones que conforman el modelo se muestran en el Anexo E.

<sup>25</sup> CARDOZO GUALDRON, Juan Carlos. Op. cit.

<sup>26</sup> ESPINOSA ROJAS, Sneydy Sthefanie & MONSALVE OSORIO, Mónica Tatiana. Op. cit.

<sup>27</sup> ÇENGEL, Yunus & CIMBALA, John. Op. cit.

<sup>28</sup> AL-SHARIF, Sharaf. Reynolds Stress Transport Modelling. En: ZHU, J., ed. Computational Simulations and Applications .China: InTech, 2011, p. 4 – 27. ISBN: 978-953-307-430-6.

**Tabla 1. Características del ordenador.**

Características	Valor
Procesador	Intel® Xeon® CPU ES-2620 0 @ 2.00GHz 2.00GHz
Memoria RAM	16 GB
Tipo de sistema	Sistema operativo de 64 bits
Tiempo estimado por simulación	48 horas

Se usaron como condiciones de frontera la velocidad a la entrada, la presión a la salida, la condición de no deslizamiento, la densidad y viscosidad del fluido, como se muestra en la Tabla 2. ANSYS estima el gradiente de presión dentro del reactor independiente del valor de presión que se establezca, en este caso fue de cero buscando que el tiempo de convergencia fuese menor. Pese a que el reactor es cilíndrico, no se aplicó la condición de simetría, porque las pruebas experimentales se realizaron en todo su diámetro.

El último paso de esta etapa es el post procesamiento, que consistió en la organización e interpretación de los datos y las imágenes obtenidas de la simulación, para ello se implementó la herramienta CFD POST de ANSYS.

**Tabla 2. Condiciones de frontera aplicadas al sistema.**

Posición [m]	Condición de frontera
$x = 0$	$\dot{V} \begin{cases} 1,26 \times 10^{-4} [m^3/s] \\ 2,52 \times 10^{-4} [m^3/s] \\ 3,15 \times 10^{-4} [m^3/s] \end{cases} \rightarrow V \begin{cases} 0,249 [m/s] \\ 0,498 [m/s] \\ 0,625 [m/s] \end{cases}$
$x = 0,579$	$P = 0 [Pa]$

### 1.3 EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL REACTOR POR UDV

En esta etapa se realizó la validación del campo de flujo del reactor obtenido con ANSYS. Para ello, se midieron los perfiles de velocidad en el reactor UIS-GIMBA

2.1 mediante la técnica UDV, utilizando el velocímetro DOP 4000 (Signal Processing S.A, Serial No. 131606.016 Savigny, Suiza, con un sensor (probe) de 5mm que tiene una frecuencia de emisión de pulsos de ultrasonido de 8 MHz (Signal Processing S.A Serie TR0806RS); el probe se soportó y protegió sobre un muesca con contacto directo en fluido; a un ángulo con respecto al eje longitudinal de la tubería ( $\theta$  en la Figura 15) de  $45^\circ$  y se usó como partícula trazadora, poliamida en polvo de densidad  $1100 \text{ [kg/m}^3\text{]}$  a una concentración de porcentaje en volumen de  $6 \times 10^{-3}\%$ , la cual está dentro del rango de  $5 \times 10^{-3}\%$  a  $0,1\%$ . Estos parámetros se estipularon siguiendo los criterios propuestos por TAKEDA<sup>29</sup> y DULHOSTE & GUILLEN<sup>30</sup>. El montaje experimental que se implementó se muestra en el Anexo F. Los perfiles registrados se compararon con los que se habían obtenido de la simulación. Esta parte experimental fue realizada en el Laboratorio del Doctor Carlos Rinaldi en The Department of Biomedical Engineering and Department of Chemical Engineering en University of Florida.

---

<sup>29</sup> TAKEDA, Yasushi. Op. cit.

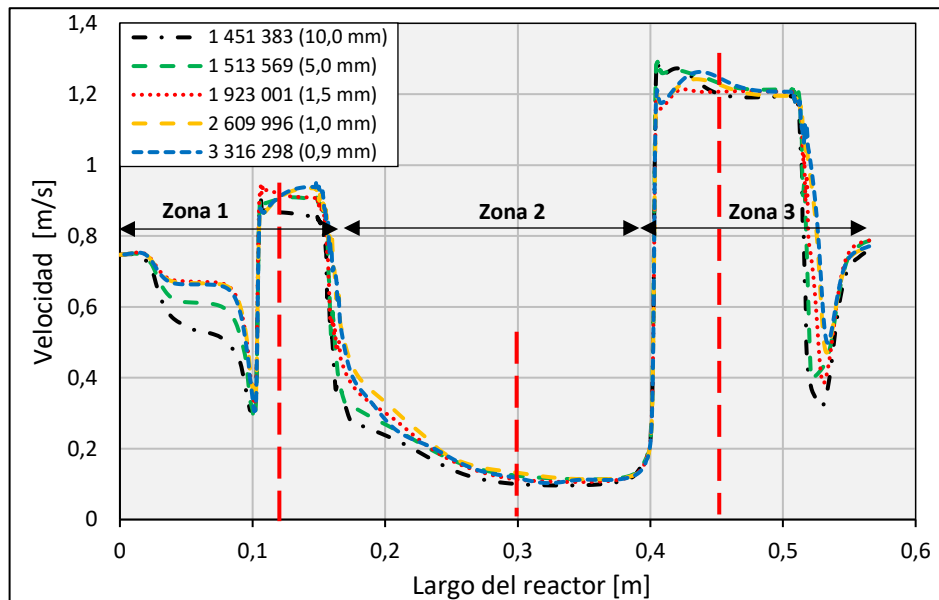
<sup>30</sup> DULHOSTE, Jean & GUILLEN, Marcos. Página multimedia dedicada a los medidores de flujo volumétrico y másico. En: Universidad de Los Andes [En línea]. Recuperado en 2017-11-20. Disponible en: [http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/djean/index\\_archivos/INST\\_Flujo/index.html](http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/djean/index_archivos/INST_Flujo/index.html)

## 2. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 2.1 VALIDACIÓN DEL MALLADO

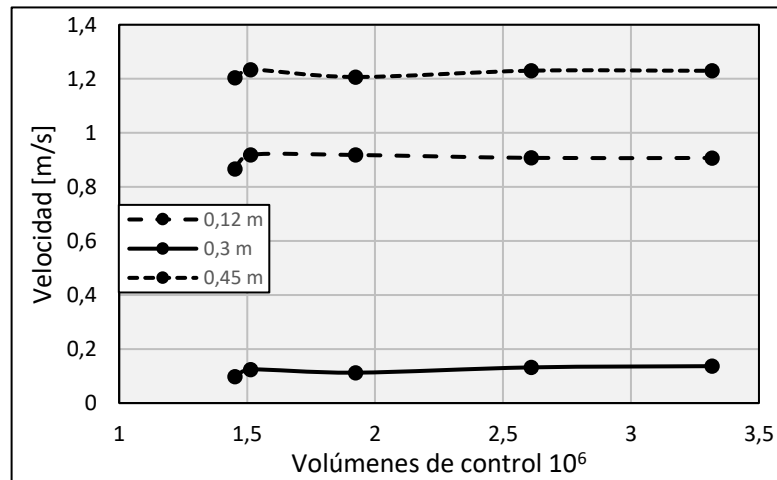
La independencia del mallado se obtuvo, realizando la simulación del fluido a diferentes tamaños de celdas, pero manteniendo un caudal fijo de  $3,15 \times 10^{-4}$  [m<sup>3</sup>/s], asegurando de una vez la validación a caudales más bajos. En la Figura 11 se muestran los perfiles de velocidad que se obtuvieron a lo largo del reactor sin electrodos.

**Figura 11. Velocidad a lo largo del reactor sin electrodos a  $3,15 \times 10^{-4}$  [m<sup>3</sup>/s].**



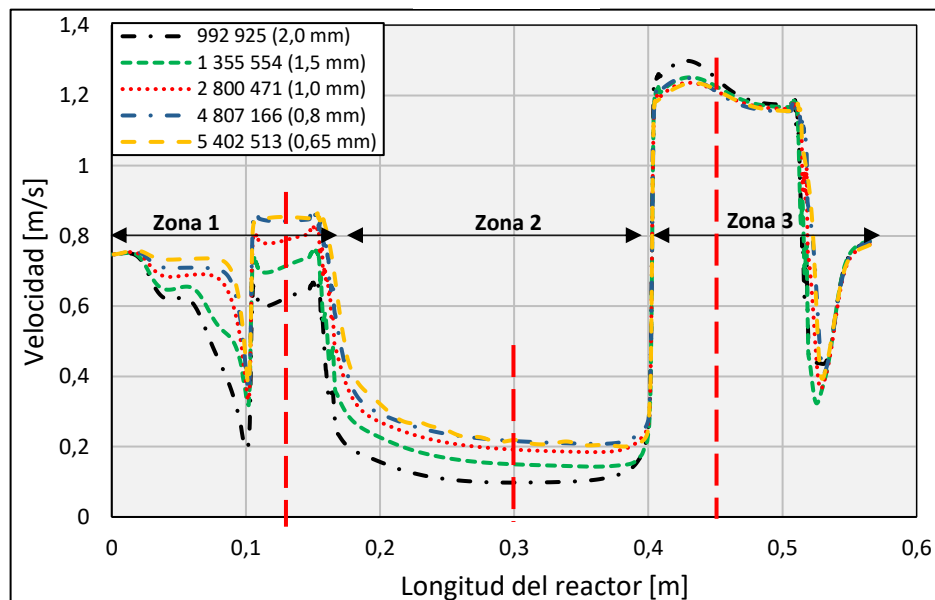
En la Figura 11 se observa que a medida que el tamaño de celda disminuye, el comportamiento de la velocidad tiene la misma tendencia. En el valor de 0,9 [mm] la curva que se obtuvo está sobrepuesta a la de 1,0 [mm], lo que da a entender que se alcanzó la independencia del mallado. Se eligió el valor de 1,0 [mm] como el adecuado para realizar las simulaciones debido a que valores menores solo generaría mayor tiempo de computo, obteniendo los mismos resultados. Para corroborar lo anterior, se realizaron tres cortes transversales en el reactor (líneas rojas), y se construyó la Figura 12.

**Figura 12. Velocidad en función del número de elementos de la malla para un flujo volumétrico de  $3,15 \times 10^{-4}$  [m<sup>3</sup>/s] en el reactor sin electrodos.**



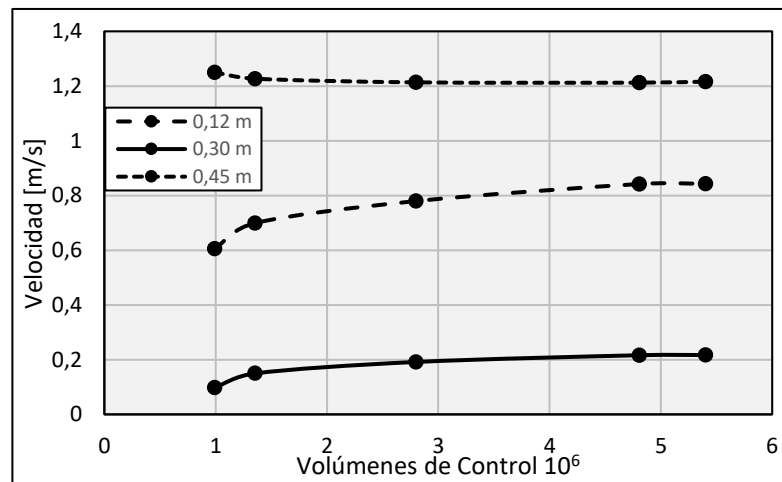
En la Figura 12, se observa que, al dividir el dominio en más de  $2,6 \times 10^6$  elementos, la velocidad del fluido es similar en los tres cortes; este número de elementos se consiguió al establecer un tamaño de ésta de 1,0 [mm], por ende, si se cumple la independencia. De igual forma, en la Figura 13 se muestran los perfiles de velocidad que se obtuvieron a lo largo del reactor con electrodos.

**Figura 13. Velocidad a lo largo del reactor con electrodos a  $3,15 \times 10^{-4}$  [m<sup>3</sup>/s].**



De la Figura 13 se observa al igual que en el reactor sin electrodos a medida que el tamaño de celda disminuye, el comportamiento de la velocidad tiende a ser la igual. La independencia se alcanzó para el tamaño de celda de 0,8 [mm] ( $4,8 \times 10^6$  volúmenes de control), puesto que, si el valor era más pequeño ocurría la superposición de la curva. Para este reactor, se optó por este valor para realizar las simulaciones por la misma justificación expuesta en el análisis en el reactor sin electrodos. También se realizaron los tres cortes transversales, obteniendo la Figura 14.

**Figura 14. Velocidad en función del número de elementos de la malla para un flujo volumétrico de  $3,15 \times 10^{-4}$  [m<sup>3</sup>/s] en el reactor con electrodos.**



Con la Figura 14 se confirma que el tamaño de celda de  $4,8 \times 10^6$  seleccionado para la independencia del mallado con electrodos es correcto, puesto que al dividir el dominio en este valor la velocidad en cualquiera de los cortes es la misma.

## 2.2 ANÁLISIS HIDRODINÁMICO DEL REACTOR UIS-GIMBA 2.1

Los perfiles de velocidad teóricos y experimentales que se obtuvieron, para los caudales previamente seleccionados (Tabla 2) y a las posiciones que se muestran en la Figura 15, para el reactor sin mallas electrolíticas se presentan en la Figura 16. En ella las líneas continuas representan los perfiles teóricos y las líneas punteadas para los perfiles experimentales.

Figura 15. Posiciones para la toma de los perfiles de velocidad en el reactor UIS-GIMBA 2.1.

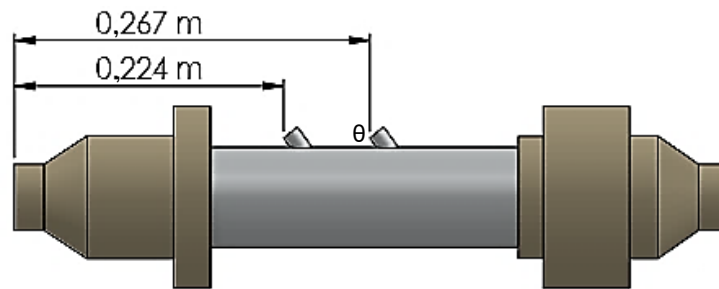
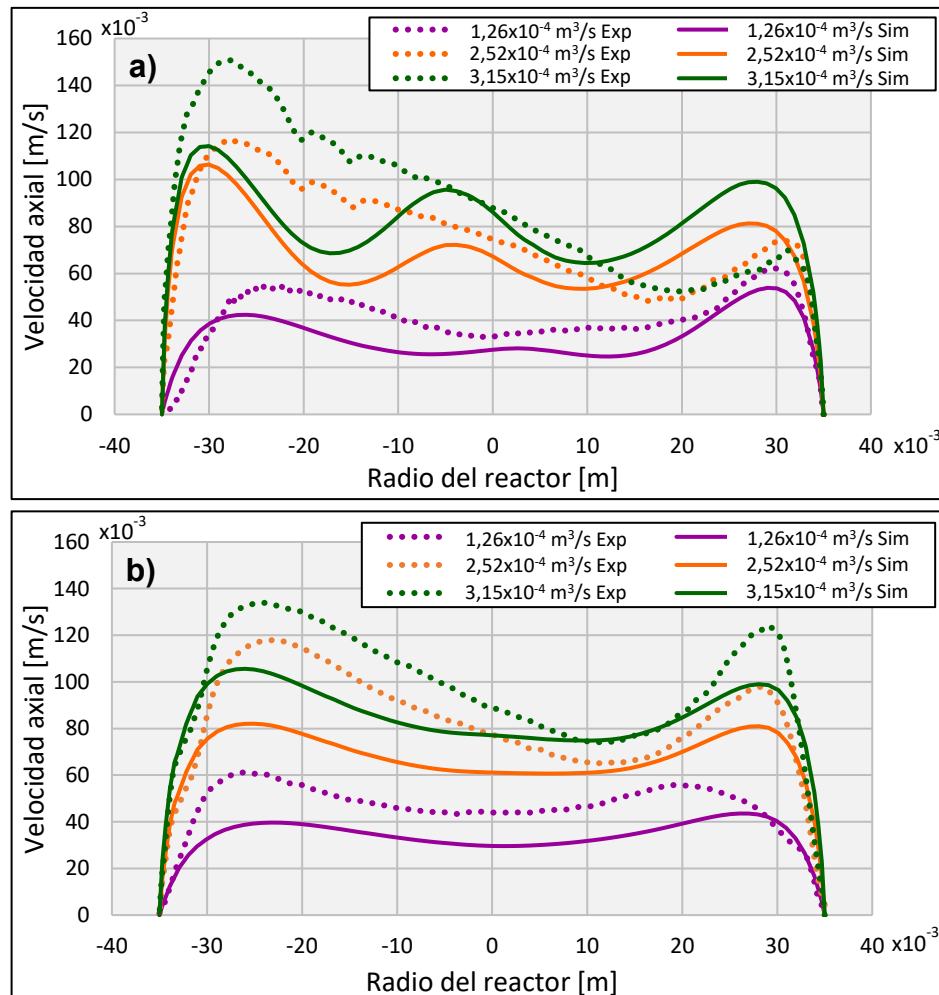


Figura 16. Perfiles de velocidad en el reactor UIS-GIMBA 2.1 sin electrodos a a) 0,224 [m] y b) 0,267 [m].



En la Figura 16 a) y b), se observa que la velocidad axial tanto teórica como experimental en función del radio del reactor no presenta un comportamiento simétrico, como se esperaría según lo indicado teóricamente y lo reportado por RUIZ & SANARABIA<sup>31</sup>, para un flujo a través de una tubería de sección transversal circular. Esta conducta se ha observado en estudios anteriores cuando el diámetro de la tubería o el espacio entre las paredes es grande en comparación con su longitud ( $L/D < 5$ )<sup>32 33 34</sup>, o bifurcación en la tubería<sup>35</sup>, donde las razones mencionadas se conocen como alteración de flujo.

En este caso, el sistema cuenta con alteraciones de flujo, debido a que la longitud del cuerpo del reactor no es lo suficientemente grande respecto a su diámetro (0,25m/0,07m < 5), lo que ocasiona efectos de recirculación en la entrada y salida que no alcanzan a disiparse.

Las alteraciones de flujo aparte de causar asimetría en el perfil de velocidad, también ocasiona uno o varios vórtices a lo largo del reactor<sup>36</sup>. En el diseño de los cabezales de entrada y salida del reactor que se presenta en la Figura 17, se visualiza que el de salida presenta menos distribuidores que el de entrada, diseño que asegurar el llenado completo del reactor<sup>37</sup>, pero genera una zona de recirculación o vórtice al final de la Zona 2. Este comportamiento se reafirmó con los perfiles que se tomaron, pues las velocidades entre  $[0, 25 \times 10^{-3} \text{ m}]$  son más pequeñas que entre  $[-35, 0 \times 10^{-3} \text{ m}]$  (Figura 16). Por otra parte, los perfiles de velocidad en las dos longitudes axiales donde fueron medidos no son iguales, lo

---

<sup>31</sup> RUIZ LIZARAZO, Jeferson Oswaldo & SANABRIA MEJÍA, Lineth Andrea. Op. cit.

<sup>32</sup> MALHAMMAR, Ake. Natural convection and inclined parallel plates [En línea] 2009. Recuperado en 2017-12-12. Disponible en: [akemalhammar.fr/articels2/parallel\\_pl\\_Inc.html](http://akemalhammar.fr/articels2/parallel_pl_Inc.html)

<sup>33</sup> FURNESS, Richard & SPITZER, David. What we think we know about upstream straight run [En línea]. Recuperado en 2017-12-17. Disponible en: [http://www.appliedmc.com/May\\_09\\_Ezine\\_page\\_2.html](http://www.appliedmc.com/May_09_Ezine_page_2.html)

<sup>34</sup> AWWA Manual. Flowmeters in Water Supply. 2 ed. Estados Unidos: American WATER Works Assoc, 2006. p. 4. ISBN 1-58321-452-6.

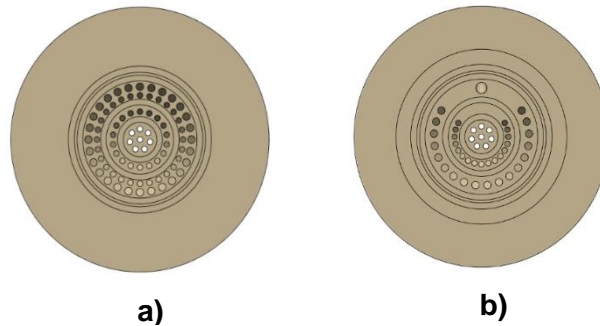
<sup>35</sup> PILOU, M., *et al.* A fully Eulerian approach to particle inertial deposition in a physiologically realistic bifurcation. En: Applied Mathematical Modelling. 2013, vol 37, no. 8. p. 5591-5605. ISSN 0307-904X.

<sup>36</sup> AWWA Manual. Op. cit.

<sup>37</sup> RUIZ LIZARAZO, Jeferson Oswaldo & SANABRIA MEJÍA, Lineth Andrea. Op. cit.

que permite inferir que el flujo no se desarrolla. En los perfiles de velocidad también se observa, que al aumentar el caudal tanto la asimetría como la concavidad de la curva incrementan, dando a entender que el vórtice que se genera es cada vez más grande.

**Figura 17. Cabezales del reactor UIS-GIMBA 2.1 a) cabezal de entrada y b) cabezal de salida.**



Los resultados obtenidos durante la simulación no modelan adecuadamente el comportamiento del fluido para la posición de 0,224 [m] en los caudales de  $2,52 \times 10^{-4}$  y  $3,15 \times 10^{-4}$  [m<sup>3</sup>/s], debido a que esta posición está cerca del cabezal de entrada, lugar donde ocurre el cambio abrupto de diámetro, provocando asimetría en el dominio del fluido, la cual se reduce a medida que aumenta la longitud del reactor, pues se puede observar que en la posición de 0,267 [m], las estimaciones brindadas por el software se asemejan mejor a la realidad.

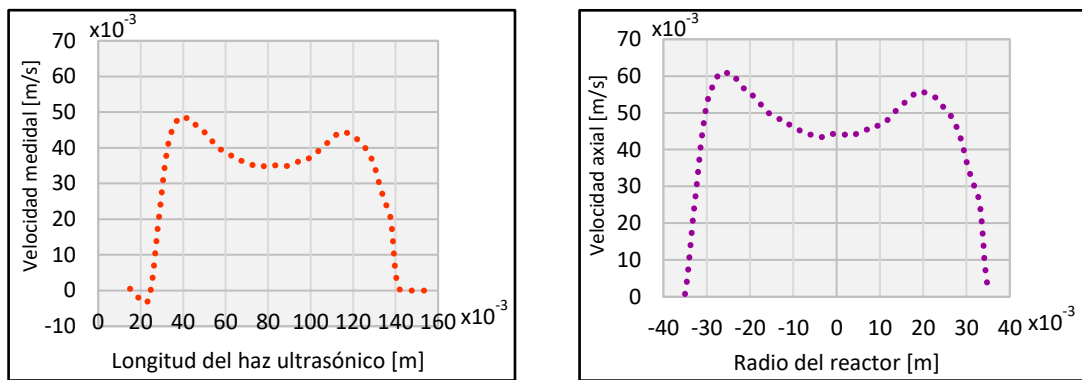
En este orden de ideas, los valores de los perfiles de velocidad en la simulación no coincidían exactamente con los experimentales, pero poseían la misma tendencia; lo que permitió que mediante este software se pudiera estimar el comportamiento del fluido. Esto benefició el caso de estudio, debido a que se quería conocer cómo los electrodos afectan la hidrodinámica del fluido.

Cabe resaltar que los perfiles teóricos se lograron realizando el post procesamiento de resultados de ANSYS, mientras que para los experimentales se extrajo directamente mediante UDV el perfil de la componente de la velocidad medida en

la dirección del haz ultrasónico ( $v_{us}$ ), como se muestra en la Figura 18 y luego haciendo uso de la ecuación (5) se convirtió en la velocidad axial del fluido ( $v_{real}$ ) [21].

$$v_{real} = \frac{v_{us}}{\cos \theta} \quad (5)$$

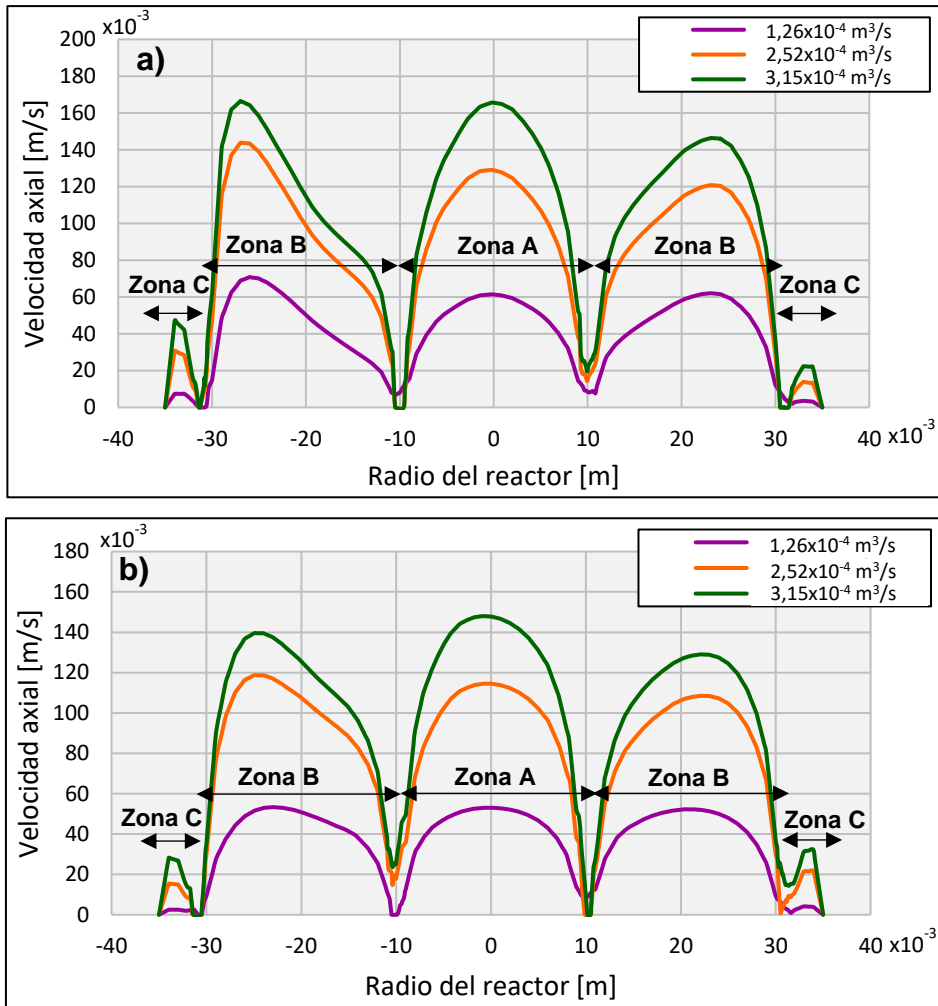
**Figura 18. Perfiles de velocidad en el reactor UIS-GIMBA 2.1 sin electrodos a lo largo de a) la trayectoria del haz ultrasónico y b) el radio.**



En la Figura 18, se observa que la forma del perfil de velocidad es la misma para ambas velocidades, pero los valores de esta varían al realizar el cambio de componente; esto se debe a que  $v_{us}$  y  $v_{real}$  son directamente proporcionales.

De igual forma, se hizo la simulación para el reactor con mallas electrolíticas y se obtuvieron los perfiles de velocidad que se presentan en la Figura 19 donde: la Zona A es el fluido que circula entre el fotocátodo, la Zona B es el fluido que circula entre el fotoánodo y el fotocátodo y la Zona C es el fluido que circula entre el fotoánodo y la pared del reactor.

**Figura 19. Perfiles de velocidad en el reactor UIS-GIMBA 2.1 con electrodos a a) 0,224 [m] y b) 0,267 [m].**



En la Figura 19 a) y b), se observa que la velocidad axial en función del radio del reactor cuando este tiene los electrodos presentó poca asimetría, comportándose como flujo a través de tubos concéntricos<sup>38</sup> y el perfil obtenido se asemeja más a una parábola; esto se debe a que, al estar los electrodos presentes disminuye el diámetro en cada división, aumentando la relación L/D (Zona A: 17,5, Zona B: 6,25, Zona C: 25). De igual manera que en el reactor sin electrodos, estos perfiles en las

<sup>38</sup> BIRD, Byron, STEWART, Warren y LIGHTFOOT, Edwin. Fenómenos de transporte. 2 ed. México: Limusa Wiley, 2006. p. 61, 87-91. ISBN 968-18-6365-8.

distintas posiciones a lo largo del reactor son diferentes, dando por entendido el flujo no se desarrolla.

No fue posible hacer las mediciones de los perfiles de velocidad mediante la técnica UDV en presencia de los electrodos, debido a que el tamaño de los agujeros de estos no son lo suficientemente grande en comparación con el probe (dimensiones de las mallas Anexo D), lo que ocasionó que la señal enviada por este se disipara a lo largo del reactor y no se obtuviera ningún perfil definido.

Con los electrodos tipo malla, se logró disminuir la asimetría del flujo, permitiendo que los resultados obtenidos mediante CFD sean más confiables, pues estudios reportados por TEZUKA *et al.*<sup>39</sup> y WEISSENBRUNNER *et al.*<sup>40</sup> han validado esta condición a través de la técnica UDV.

Por otro lado, el fluido que circula en la Zona A y Zona B, tienen la misma tendencia, aunque entre el radio de  $[-35, -10 \times 10^{-3} \text{ m}]$  la velocidad es mayor que entre el radio de  $[10, 35 \times 10^{-3} \text{ m}]$ , de lo que se infiere que aún el fluido tiene preferencia de salir por la parte inferior del reactor. El fluido que circula por la Zona C presenta la menor velocidad, pues esta sección no cuenta con distribuidores ocasionando estancamiento del fluido. Este fenómeno aumenta a medida que el caudal se hace más grande, para el caudal de  $1,26 \times 10^{-4} \text{ [m}^3/\text{s]}$  la diferencia entre las velocidades de la Zona B y C es  $53 \times 10^{-3} \text{ [m /s]}$ , mientras que, para el caudal de  $3,15 \times 10^{-4} \text{ [m}^3/\text{s]}$  es  $120 \times 10^{-3} \text{ [m /s]}$ .

Para verificar el régimen de flujo en el reactor sin y con electrodos, mediante el software se usó el parámetro denominado *intensidad de turbulencia* o nivel de turbulencia, el cual indica qué tan turbulento es el flujo, y se define como:

---

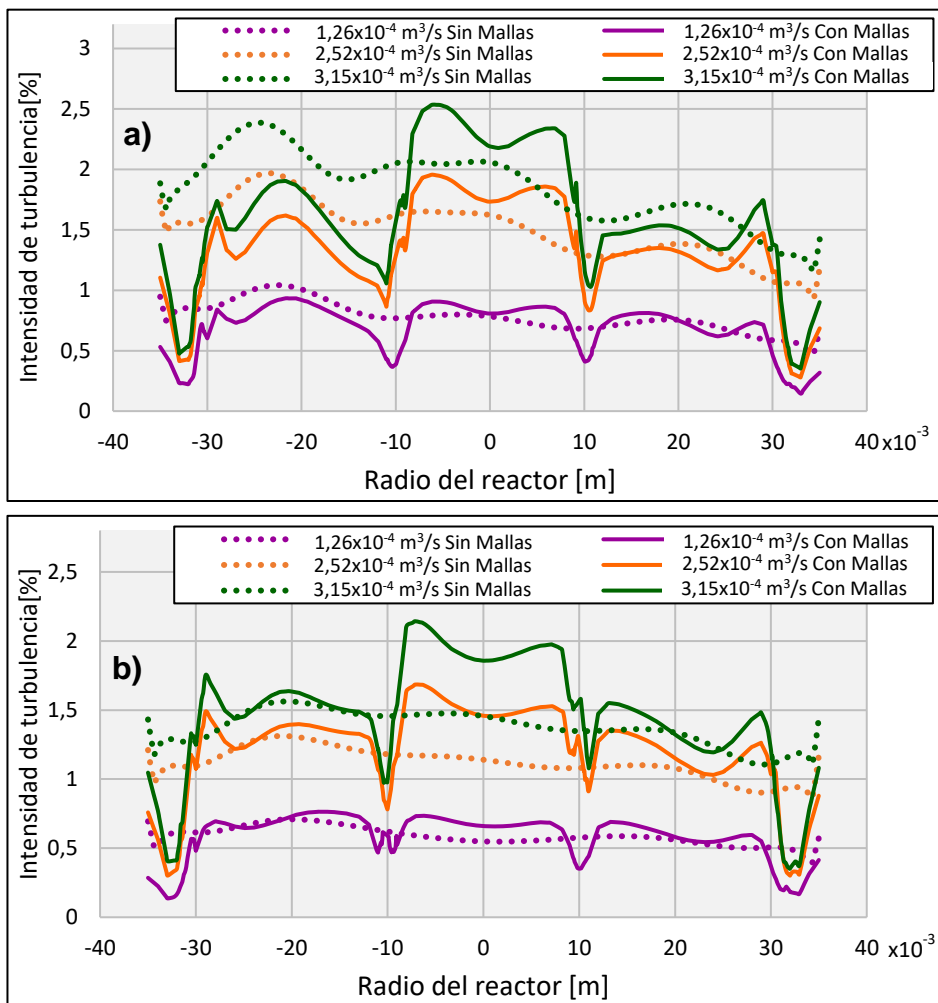
<sup>39</sup> TEZUKA, Kenichi, *et al.* Assessment of Effects of Pipe Surface Roughness and Pipe Elbows on the Accuracy of Meter Factors Using the Ultrasonic Pulse Doppler Method. En: Journal of Nuclear Science and Technology. 2008, vol.45, no. 4. p. 304-312. ISSN 0022-3131.

<sup>40</sup> WEISSENBRUNNER, A., *et al.* Simulation-based determination of systematic errors of flow meters due to uncertain inflow conditions. En: Flow Measurement and Instrumentation. 2016, vol. 52. p. 25-39. ISSN 0955-5986.

$$I = \frac{u'}{U} \quad (6)$$

Donde  $u'$  es la magnitud de las fluctuaciones de velocidad y  $U$  es la velocidad media<sup>41</sup>; los resultados para el reactor sin y con electrodos en las mismas posiciones se presentan en la Figura 20.

**Figura 20. Perfiles de intensidad de turbulencia en el reactor UIS-GIMBA 2.1 sin y con electrodos a) 0,224 [m] y b) 0,267 [m].**



<sup>41</sup> CFD ONLINE. Turbulence intensity [En línea]. 2017. Recuperado en 2017-12-29. Disponible en: [https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence\\_intensity](https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_intensity)

De la Figura 20 a) y b), se observa que la intensidad de turbulencia está en el rango entre [1%-5%] para los caudales de  $2,52 \times 10^{-4}$  y  $3,15 \times 10^{-4}$  [m<sup>3</sup>/s], mientras que para el caudal de  $1,26 \times 10^{-4}$  [m<sup>3</sup>/s] el valor es menor que 1%, donde los primeros se clasifican como flujos de turbulencia media, característico de flujos con número bajo de Reynolds ( $Re > 4000$ ); mientras que el segundo se clasifica de turbulencia baja, flujos en el límite de régimen laminar y turbulento<sup>42</sup>; según esto, el caudal de entrada y la intensidad de turbulencia son variables directamente proporcionales. Para la posición de 0,224 [m] la intensidad de turbulencia es mayor para cuando el reactor no tiene electrodos, mientras que para la posición de 0,267 [m] ocurre lo contrario, lo que demuestra que las mallas sí son promotoras de turbulencia, pero esto sucede casi al final del cuerpo del reactor. Además, para el caudal  $1,26 \times 10^{-4}$  [m<sup>3</sup>/s] la diferencia de la intensidad de turbulencia en el cuerpo del reactor sin y con electrodos es de 0,1%, en cambio para el caudal de  $3,15 \times 10^{-4}$  [m<sup>3</sup>/s] es de 0,7%.

Cuando se implementan las mallas, el flujo que circula entre la Zona C posee una intensidad de turbulencia pequeña respecto al fluido que circula entre las otras zonas, verificando una vez más que en esta sección el fluido se estanca.

## **2.3 ALTERNATIVA DE DISEÑO PARA LA HIDRODINÁMICA DEL REACTOR UIS-GIMBA 2.1**

Con el fin de eliminar la asimetría del flujo y el estancamiento de este en ciertas zonas en el reactor UIS-GIMBA 2.1 en presencia de los electrodos tipo malla, se modificó la geometría del reactor.

Para disminuir la asimetría se decidió seguir la recomendación dada por FURNESS & SPITZER<sup>43</sup>, de emplear una relación mínima de 5 entre el largo del cuerpo del

---

<sup>42</sup> RANADE, Vivek. Computational Flow Modeling for Chemical Reactor Engineering. 1 ed. Estados Unidos: Academic Press, 2002. p. 79. ISBN 0-12-576960

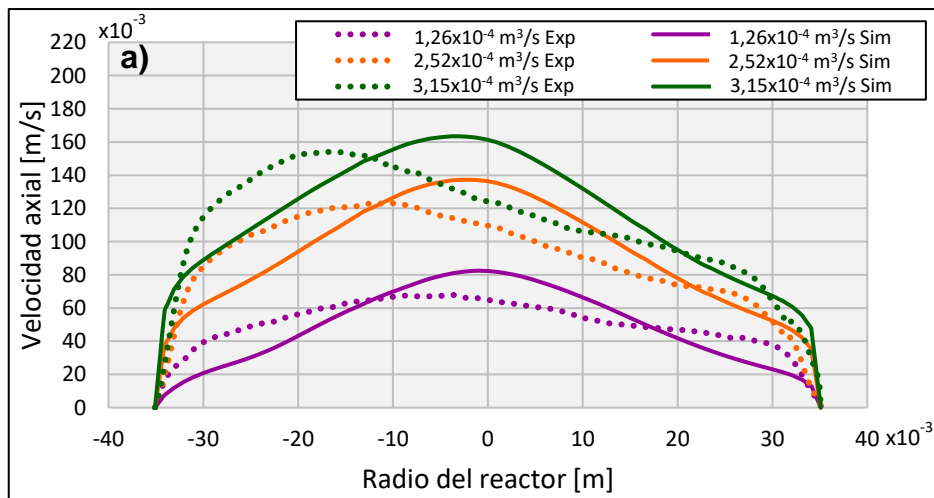
<sup>43</sup> FURNESS, Richard & SPITZER, David. Op. cit.

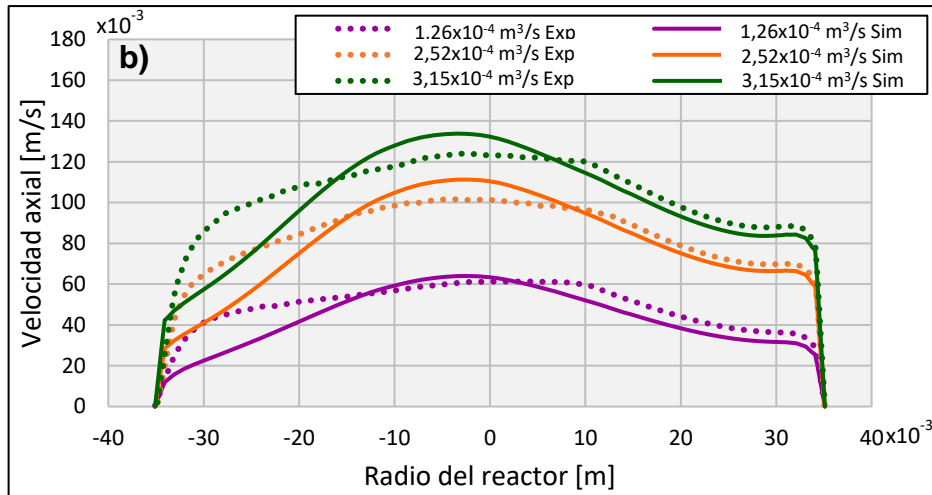
reactor y su diámetro; ya que a partir de este valor la velocidad axial en función del radio no presenta esta condición. Debido que el diámetro interno del cuerpo del reactor es de 0,07 [m], la nueva longitud de este fue 0,35 [m]; aumentando 0,1 [m] respecto al equipo UIS-GIMBA 2.1.

Por otro lado, reducir los sectores de estancamiento del fluido asegura que este fluya con igual velocidad en cualquier posición a lo largo del diámetro. Por ello, se incluyeron distribuidores en el cabezal de entrada y de salida entre la pared del reactor y el fotoánodo (Zona C), con el fin de incrementar la cantidad de fluido que circula por esta sección. Los planos de los cabezales modificados se muestran en el Anexo G.

De la misma manera que en el reactor anterior, en la Figura 21 se muestran los perfiles de velocidades teóricas y experimentales para el nuevo reactor (UIS-GIMBA 2.2) sin electrodos; a iguales caudales, pero en las posiciones 0,363 [m] y 0,409 [m], debido a que el largo de la parte central cambió.

**Figura 21. Perfiles de velocidad en el reactor UIS-GIMBA 2.2 sin electrodos a a) 0,363 [m] y b) 0,409 [m].**



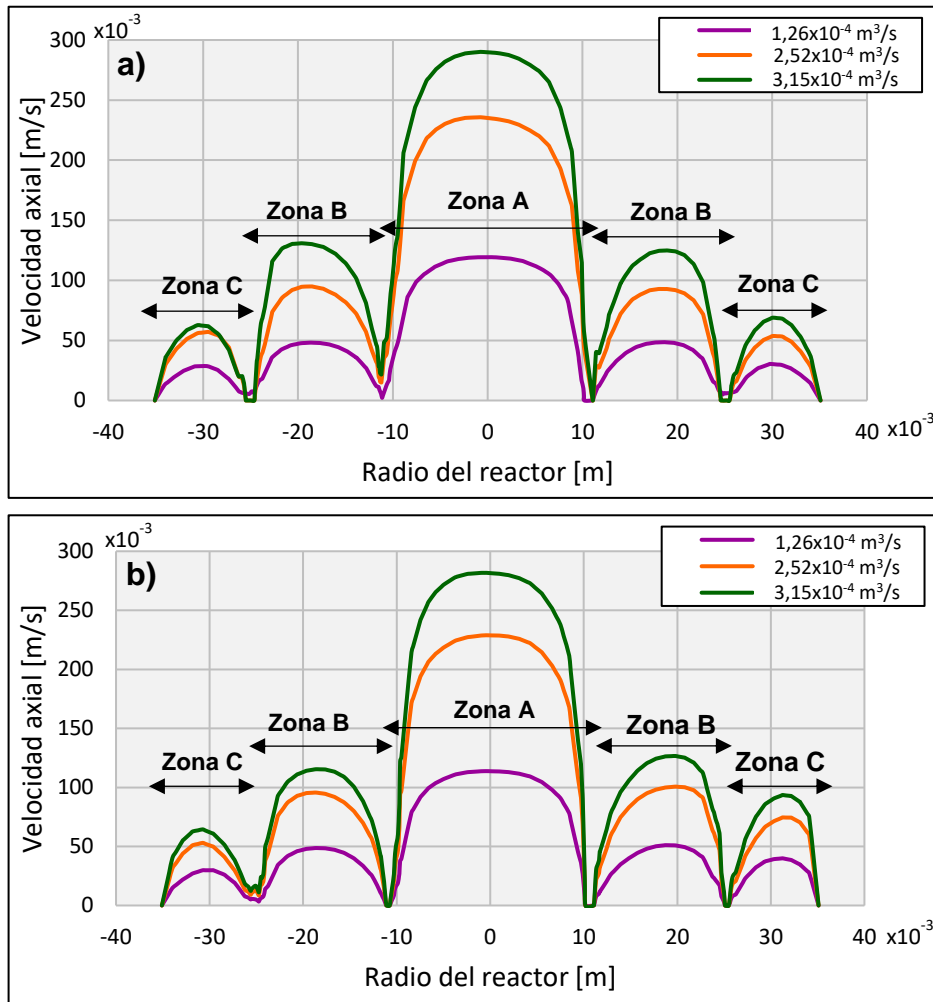


En la Figura 21 a) y b), se observa que los perfiles de velocidad no presentan una concavidad pronunciada, la asimetría de la velocidad axial respecto al diámetro se redujo considerablemente en comparación con el reactor UIS-GIMA 2.1. Esto permitió que los resultados obtenidos en la simulación se asemejaran mejor a los registrados experimentalmente; ocasionando que los perfiles estimados mediante ANSYS sean más confiables, pues a pesar de que los valores no coinciden en su totalidad, la tendencia de las curvas es casi la misma, en especial para la posición de 0,409 [m] (Figura 21 b).

Aunque la asimetría disminuye, aún se observa que se existe una pequeña zona de recirculación a la salida del reactor, puesto que la velocidad en los radios entre [10, 30  $\times 10^{-3}$  m] es menor que en [-30, -10  $\times 10^{-3}$  m] y además incrementa levemente a medida que se aumenta el caudal.

Del mismo modo, en la Figura 22, se muestran los perfiles de velocidad teniendo en cuenta los electrodos en las mismas posiciones descritas anteriormente.

Figura 22. Perfiles de velocidad en el reactor UIS-GIMBA 2.2 con electrodos a a) 0,363 [m] y b) 0,409 [m].

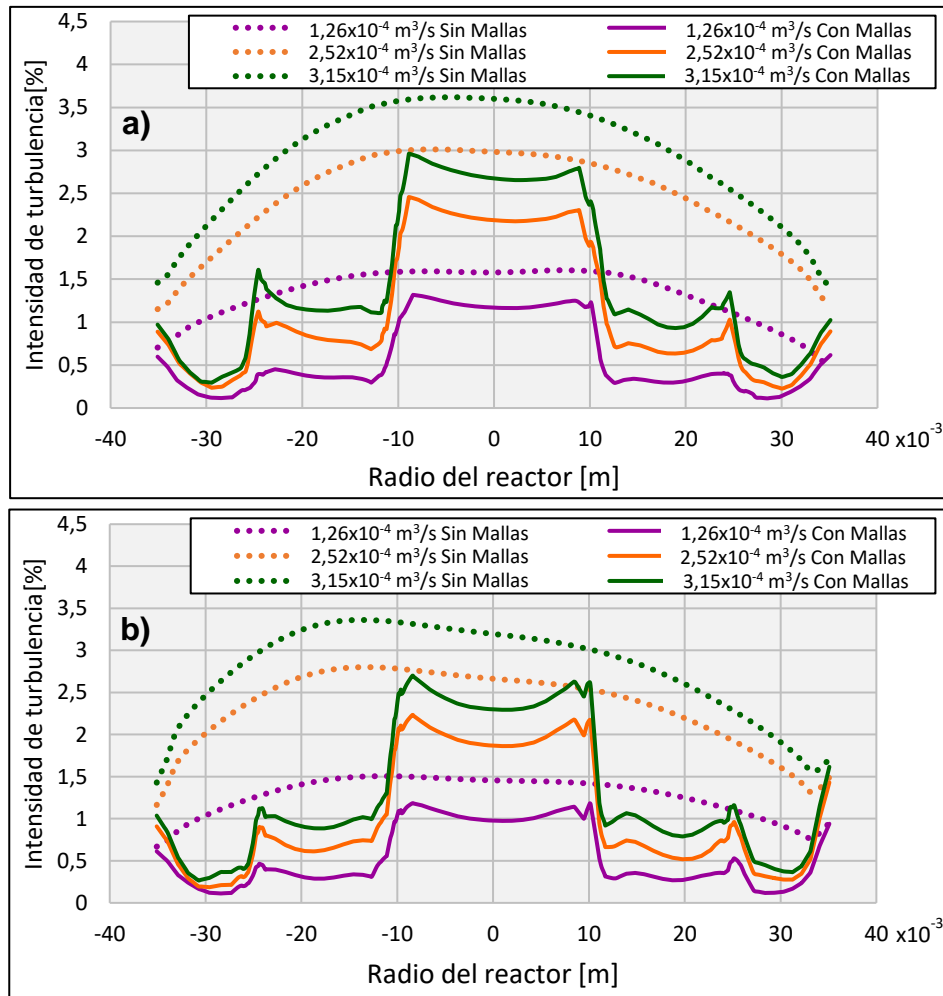


En la Figura 22 a) y b), cabe resaltar que, al incluir los electrodos en el dominio de la simulación, la asimetría que presenta el sistema es casi nula, la curva describió una parábola bien definida y la relación L/D aumentó (Zona A: 15,91, Zona B: 12,5), pero no ocurrió lo mismo en la Zona C (L/D: 17,5), debido a que en esta aumentó el diámetro pues se implementaron distribuidores en esta sección. También, las velocidades en ambas posiciones es prácticamente la misma a lo largo de la sección transversal del reactor, dando por entendido que el flujo se desarrolla.

La velocidad en la Zona A y Zona B es diferente a la encontrada en el anterior reactor, dicha diferencia incrementa cuando se trabajan caudales más grandes. Pese que aumentó la velocidad de la Zona C en aproximadamente 0,2 [m/s] para los tres caudales, sigue presentándose en esta sección estancamiento de fluido, ya que los valores difieren considerablemente respecto a la Zona A y B.

También se estimó la intensidad de turbulencia para el nuevo reactor sin y con electrodos, y los resultados encontrados se enseñan en la Figura 23.

**Figura 23. Perfiles de intensidad de turbulencia en el reactor UIS-GIMBA 2.2 sin y con electrodos a a) 0,363 [m] y b) 0,409 [m].**



De la Figura 23 a) y b), se observa que la intensidad de turbulencia aumentó para las dos situaciones (sin y con electrodos), pero estas no superan el valor de 5%, es decir, se clasifican nuevamente como flujos de turbulencia media; sin embargo, cuando están presentes las mallas, en la Zona B y C, el valor es menor que 1%. Referente a esto, la turbulencia del sistema con mallas aumentó en comparación con el reactor anterior, pero estos valores no son mayores a los encontrados en el rediseño sin electrodos, dando a entender que, para las dos posiciones los electrodos no son promotores de turbulencia en el nuevo reactor. Aunque no se reportan estudios preliminares respecto a este caso, se plantea que al aumentar la longitud del cuerpo del reactor como lo recomienda la teoría, la velocidad en este incrementa ( $L \propto D \propto Re \propto V$ ), lo que lleva a que el tiempo de residencia del fluido disminuya, provocando que el fluido tenga menos tiempo para atravesar los agujeros de los electrodos.

### 3. CONCLUSIONES

- El reactor UIS-GIMBA 2.1 presenta problemas en la simetría de la distribución de velocidad, debido a que el cuerpo de este no es lo suficientemente largo en comparación con su diámetro ( $0,25[m]/0,07[m]<5$ ).
- El incremento de la velocidad de entrada del fluido en el reactor provoca que la asimetría del flujo aumente y a su vez el tamaño del vórtice presente al final de la Zona 2, debido a que el cabezal de salida no tiene suficientes distribuidores.
- Los electrodos tipo malla son promotores de turbulencia en el reactor UIS-GIMBA 2.1, pero esto sucede casi al final del cuerpo del reactor, pues se observó que en la posición  $0,267 [m]$  ocurre un aumento de la intensidad de turbulencia de  $0,1\%$  para el caudal de  $1,26 \times 10^{-4} [m^3/s]$  y de  $0,7\%$  para el máximo caudal ( $3,15 \times 10^{-4} [m^3/s]$ ) al implementar estos.
- La asimetría disminuye significativamente al realizar las modificaciones en el diseño del reactor (incrementar la longitud del cuerpo), mejorando la hidrodinámica del fluido donde las estimaciones mediante CFD se aproximan más a la realidad. Además, al incluir los electrodos tipo malla en el sistema se observó, que estos sólo son promotores de turbulencia cuando la relación  $L/D$  es menor que 5. Puesto que, en el rediseño para los caudales  $1,26 \times 10^{-4} [m^3/s]$  (mínimo) y  $3,15 \times 10^{-4} [m^3/s]$  (máximo), la intensidad de turbulencia es más pequeña con un valor de  $1$  y  $0,5\%$  respectivamente cuando se usan los electrodos.

#### 4. RECOMENDACIONES

- Para tener mejores estimaciones mediante CFD debido a la asimetría, se sugiere implementar los modelos de turbulencia LES o DES que trabajan con las ecuaciones de cantidad de movimiento en tiempo real más no con su promedio, por lo que se puede lograr mejores resultados, aunque requieren de mejores características computacionales.
- Se sugiere que, para realizar las mediciones experimentales del reactor con los electrodos tipo malla, la técnica usada sea Velocimetría de Superficie Laser (LSV, Laser Surface Velocimeter), ya que el haz de luz es más delgado que el ultrasónico y puede cruzar por medio de los agujeros de las mallas.

## BIBLIOGRAFÍA

AL-SHARIF, Sharaf. Reynolds Stress Transport Modelling. En: ZHU, J., ed. Computational Simulations and Applications .China: InTech, 2011, p. 4 – 27. ISBN: 978-953-307-430-6.

ANDERSSON, Bengt, *et al.* Computational Fluid Dynamics for Engineers. 1 ed. Estados Unidos: Cambridge University Press, 2012. p. 96-99. ISBN 978-1-107-01895-2.

BIRD, Byron, STEWART, Warren y LIGHTFOOT, Edwin. Fenómenos de transporte. 2 ed. México: Limusa Wiley, 2006. p. 61, 87-91. ISBN 968-18-6365-8.

BUHI, S., *et al.* Comparative study of turbulence models for scale-resolving simulaions of internal combustion engine flows. Computers & fluids. 2017, no. 156, p. 66-80. ISSN 0045-7930.

CARDOZO GUALDRON, Juan Carlos. Evaluación de la estabilidad y fotoactividad de S-TiO<sub>2</sub> soportado sobre mallas metálicas para la degradación del surfactante Shell Enordet O242 presente en aguas de producción de petróleo utilizando un reactor tubular y luz visible. Trabajo de investigación Magíster en Ingeniería química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería química, 2016, 19-138 p.

ÇENGEL, Yunus & CIMBALA, John. Mecánica de fluidos. 1 ed. México: McGraw-Hill, 2006. p. 818, 823-826, 841. ISBN 970-10-5612-4.

DULHOSTE, Jean & GUILLEN, Marcos. Página multimedia dedicada a los medidores de flujo volumétrico y másico. En: Universidad de Los Andes [En línea].

Recuperado en 2017-11-20. Disponible en:  
[http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/djean/index\\_archivos/INST\\_Flujo/index.html](http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/djean/index_archivos/INST_Flujo/index.html)

ESPINOSA ROJAS, Sneidy Sthefanie & MONSALVE OSORIO, Mónica Tatiana. Evaluación de la degradación de un surfactante aniónico empleado en el recobro químico del petróleo con S-TiO<sub>2</sub> en suspensión y luz visible en un fotorreactor tubular. Trabajo de grado Ingeniera química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería química, 2015, 18-46 p.

FRAGA, I., *et al.* Nonintrusive Method to Compute Water Discharge in Pipes with a Low Depth-to-Diameter Ratio Using Ultrasonic Doppler Velocimetry. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2015, vol. 141, no. 3. ISSN 0733-9429.

JAKOBSEN, Hugo. *Chemical Reactor Modeling*. 2 ed. Suiza: Springer, 2014. 128-160 p. ISBN 978-3-319-05091-1.

JAVIDINEJAD, Amir. FEA Practical Illustration of Mesh-Quality-Results Differences between Structured Mesh and Unstructured Mesh. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012, Vol. 2012, p. 1-7. ISSN: 2090-5122.

LAITÓN ROZO, Nohelio Eduardo & PUENTES CORREA, Ludy Silvana. Evaluación de la degradación fotocatalítica de un surfactante aniónico presente en el agua de producción del petróleo usando S-TiO<sub>2</sub> soportado y luz visible en un fotorreactor tubular. Trabajo de grado Ingeniera química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería química, 2015, 19-51 p.

LOZADA GARCÍA, Nayla Xiomara. Modelamiento y simulación numérica de la dilución crudo pesado-nafta en un mezclador estático utilizando una herramienta de

dinámica computacional de fluidos (CFD). Trabajo de grado Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos, 2015, 18–49 p.

MADENCI, Erdogan. & GUVEN, Ibrahim. The finite element method and applications in engineering using ansys. New York: Springer, 2006. p. 83, 160. ISBN 0-387-28289-0.

PRIETO JIMÉNEZ, Natalia. Análisis del comportamiento fluidodinámico de la suspensión bagazo de caña de azúcar-agua en tubos con mezcladores estáticos. Trabajo de grado Ingeniería química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería química, 2008, 8-9 p.

RANADE, Vivek. Computational Flow Modeling for Chemical Reactor Engineering. 1 ed. Estados Unidos: Academic Press, 2002. p. 79. ISBN 0-12-576960.

RODRIGUEZ PESTAÑA, Claudia. Simulación numérica de la estela tras un cuerpo de base Roma a números de Reynolds altos: la influencia de los modelos de turbulencia. Trabajo de grado Ingeniería en Tecnologías Industriales. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos, 2015, 8-56 p.

RUIZ LIZARAZO, Jeferson Oswaldo & SANABRIA MEJÍA, Lineth Andrea. Estudio hidrodinámico de un reactor fotoelectroquímico tubular mediante dinámica de fluidos computacional. Trabajo de grado Ingeniera química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería química, 2016, 11-36 p.

SÁNCHEZ VÁSQUEZ, Jesús. Simulación numérica directa en paralelo de las ecuaciones de Navier-Stokes en flujos con capa límite desprendida. Aplicaciones

en instalaciones deportivas con gradas cubiertas. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Sevilla: Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingenieros, 2004, 56, 67-68 p.

SIGNAL PROCESSING S.A.DOP 4000 series user's manual. Suiza. Software: 6.4, revisión 1. p. 49.

TAKEDA, Yasushi Ultrasonic Doppler Velocity Profile for Fluid Flow. Japón: Springer, 2012. p. 21. ISBN 978-4-431-54025-0.

## ANEXOS

### Anexo A Ecuaciones de Navier Stokes.

Las ecuaciones de Navier-Stokes son ecuaciones no lineales y de segundo orden con cuatro variables independientes que describen el comportamiento de los fluidos<sup>44</sup>.

En esta ecuación se tiene en cuenta las fuerzas externas que se aplican al fluido, las cuales producen el movimiento de este las cuales son: fuerzas de superficie (presión y esfuerzos viscosos) y fuerzas másicas (gravedad y las fuerzas debido a la rotación)<sup>45</sup>.

Las ecuaciones que describen el movimiento de los fluidos son:

#### Ecuación de Continuidad

En un volumen de control en el fluido donde se conserva la masa (la masa que entra es igual a la que sale), fijo en el espacio (Figura 13), la expresión del balance se define como:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{velocidad} \\ \text{de aumento} \\ \text{de materia} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{velocidad} \\ \text{de entrada} \\ \text{de materia} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{velocidad} \\ \text{de salida} \\ \text{de materia} \end{array} \right\} \quad (7)$$

Considerando las dos caras sombreadas, las cuales son perpendiculares al eje x, la velocidad de entrada de materia en el volumen de control a través de la cara sombreada en x es  $(\rho v_x)|_x \Delta y \Delta z$  y la velocidad de salida de materia a través de la cara sombreada en  $x+\Delta x$  es  $(\rho v_x)|_{x+\Delta x} \Delta y \Delta z$ . De la misma manera, se realiza el balance para las otras dos pares de caras; la velocidad de incremento de materia

---

<sup>44</sup> RODRIGUEZ PESTAÑA, Claudia. Op. cit.

<sup>45</sup> *Ibíd.*

dentro del volumen de control es  $\Delta x \Delta y \Delta z (\partial \rho / \partial t)$ <sup>46</sup>. Por lo tanto, el balance resultante es:

$$\begin{aligned} \Delta x \Delta y \Delta z \frac{\partial \rho}{\partial t} = & \Delta y \Delta z [(\rho v_x)|_x - (\rho v_x)|_{x+\Delta x}] + \\ & \Delta x \Delta z [(\rho v_y)|_y - (\rho v_y)|_{y+\Delta y}] + \\ & \Delta x \Delta y [(\rho v_z)|_z - (\rho v_z)|_{z+\Delta z}] \end{aligned} \quad (8)$$

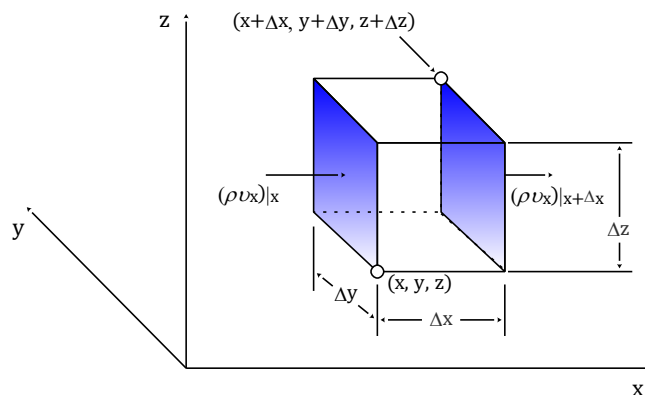
Al dividir la ecuación entre  $\Delta x \Delta y \Delta z$  y tomar el límite cuando  $\Delta x, \Delta y$  y  $\Delta z$  tienden a cero, se obtiene:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \left( \frac{\partial \rho v_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho v_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho v_z}{\partial z} \right) \quad (9)$$

Esta ecuación describe la velocidad de variación respecto al tiempo de la densidad del fluido en un punto fijo en el espacio. Escrita de una manera más breve usando la notación vectorial se obtiene:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\nabla \cdot \rho \mathbf{v}) \quad (10)$$

**Figura A.1. Balance de masa en un elemento de volumen fijo  $\Delta x \Delta y \Delta z$  a través del que circula un fluido.**



Fuente: Modificado de: BIRD, Byron, STEWART, Warren y LIGHTFOOT, Edwin. Fenómenos de transporte. 2 ed. México: Limusa Wiley, 2006. p. 61, 87-91. ISBN 968-18-6365-8.

<sup>46</sup> BIRD, Byron, STEWART, Warren y LIGHTFOOT, Edwin. Op. cit.

Las flechas indican la densidad de flujo de masa de entrada y salida en el volumen de control en las dos caras sombreadas localizadas en  $x$  y  $\Delta x$ .

### Ecuación de Cantidad de Movimiento

De igual manera, para obtener esta ecuación se realiza un balance en un volumen de control en el fluido de  $\Delta x \Delta y \Delta z$  (Figura 13), donde el balance es de cantidad de movimiento de la forma:

$$\begin{bmatrix} \text{velocidad de} \\ \text{incremento} \\ \text{de cantidad} \\ \text{de movimiento} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{velocidad de} \\ \text{entrada} \\ \text{de cantidad} \\ \text{de movimiento} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{velocidad de} \\ \text{salida} \\ \text{de cantidad} \\ \text{de movimiento} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{fuerza} \\ \text{externo sobre} \\ \text{el fluido} \end{bmatrix} \quad (11)$$

La velocidad a la que la componente en  $x$  de cantidad de movimiento entra a través de la cara sombreada en  $x$  por todos los mecanismos (tanto convectivo como molecular) es  $(\phi_{xx})|_x \Delta y \Delta z$  y la velocidad a la que sale de la cara sombreada en  $x + \Delta x$  es  $(\phi_{xx})|_{x+\Delta x} \Delta y \Delta z$ . Las velocidades a las que la cantidad de movimiento en la dirección de  $x$  entra y sale a través de las caras en  $y$  y  $y + \Delta y$  son  $(\phi_{yx})|_y \Delta x \Delta z$  y  $(\phi_{yx})|_{y+\Delta y} \Delta x \Delta z$  [26]. Al sumar estas contribuciones se obtiene la rapidez neta de adición de cantidad de movimiento en la dirección  $x$  a través de las tres pares de caras:

$$\Delta y \Delta z (\phi_{xx}|_x - \phi_{xx}|_{x+\Delta x}) + \Delta x \Delta z (\phi_{yx}|_y - \phi_{yx}|_{y+\Delta y}) + \Delta x \Delta y (\phi_{zx}|_z - \phi_{zx}|_{z+\Delta z}) \quad (12)$$

La fuerza externa que actúa sobre el volumen de control del fluido en la componente  $x$  es:

$$\rho g_x \Delta x \Delta y \Delta z \quad (13)$$

Así, la suma de estos términos debe igualarse a la velocidad de incremento de cantidad de movimiento en la dirección de  $x$  dentro del volumen de control:  $\Delta x \Delta y \Delta z \partial(\rho v_x)/\partial t$ . Al realizar esto se obtiene la expresión del balance de cantidad de movimiento en la dirección de  $x$  y al dividir dicha expresión entre  $\Delta x \Delta y \Delta z$ , y aplicando el límite cuando  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  tienden a cero se obtiene:

$$\frac{\partial \rho v_x}{\partial t} = - \left( \frac{\partial \phi_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \phi_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \phi_{zx}}{\partial z} \right) + \rho g_x \quad (14)$$

De la misma manera se pueden obtener las expresiones para componente de  $y$  y de  $z$ , y al usar la notación vectorial-tensional, estas tres ecuaciones pueden escribirse como:

$$\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} = -[\nabla \cdot \phi]_i + \rho g_i \quad i = x, y, z \quad (15)$$

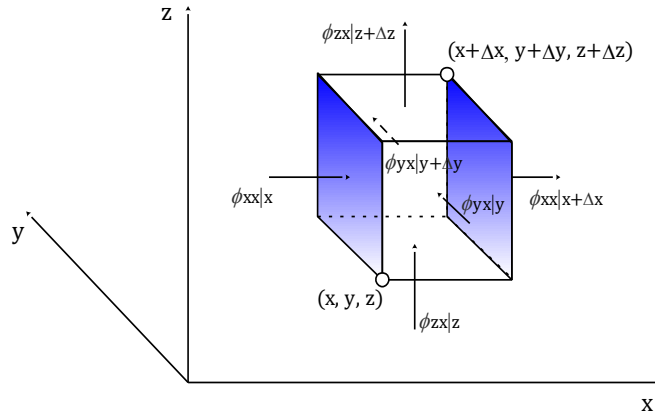
Cuando la  $i$  – ésima componente de la ecuación (13) se multiplica por el vector unitario en la  $i$  – ésima dirección y las tres componentes se suman vectorialmente, se obtiene:

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} = -[\nabla \cdot \phi] + \rho g \quad (16)$$

El tensor de densidad de flujo de cantidad de movimiento combinado  $\phi$  es la suma del tensor de densidad de flujo de cantidad de movimiento convectivo  $\rho v v$  y el tensor de densidad de flujo de cantidad de movimiento molecular  $\pi$ , que a su vez éste término es la suma de  $p\delta + \tau$ , es decir,  $\phi = \rho v v + p\delta + \tau$ , al reemplazar esta expresión en la ecuación 16, se obtiene la siguiente ecuación de cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + [\nabla \cdot \rho v v] = -\nabla p - [\nabla \cdot \tau] + \rho g \quad (17)$$

**Figura A.2. Balance de cantidad de movimiento en un elemento de volumen fijo  $\Delta x \Delta y \Delta z$  a través del que circula un fluido.**



Fuente: Modificado de: BIRD, Byron, STEWART, Warren y LIGHTFOOT, Edwin. Fenómenos de transporte. 2 ed. México: Limusa Wiley, 2006. p. 61, 87-91. ISBN 968-18-6365-8.

Las seis flechas que indican la densidad de flujo de cantidad de movimiento en la dirección de  $x$  a través a través de las superficies por todos los mecanismos. Las caras sombreadas están ubicadas en  $x$  y  $x + \Delta x$ .

## Anexo B Resumen de modelos de turbulencia de la familia RANS.

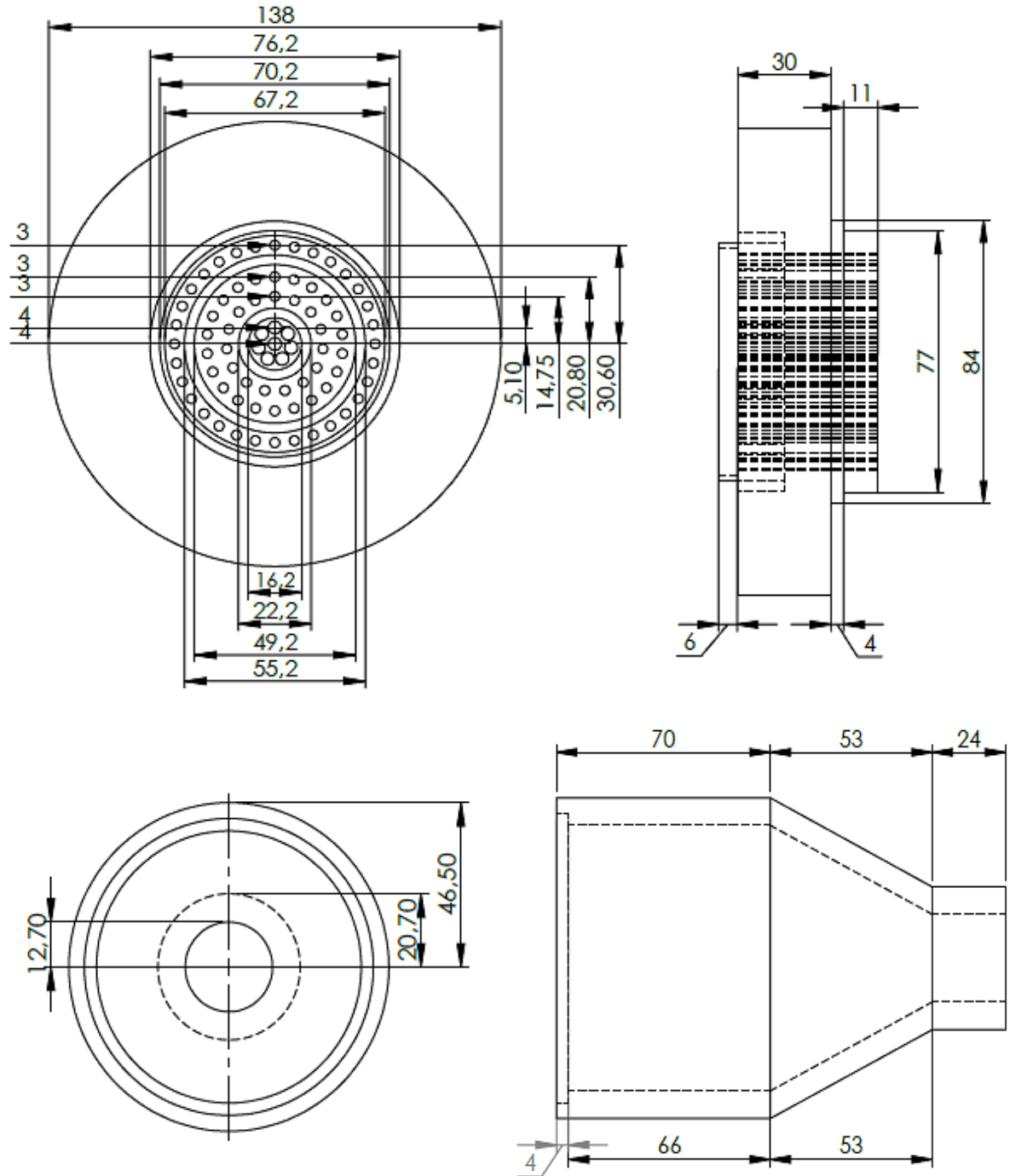
Modelo	Ventajas	Desventajas
1 Ecuación		
Spalart-Allmaras	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emplea solo una ecuación para resolver la viscosidad turbulenta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseñado para aplicaciones aeroespaciales que involucran flujos con una malla fina cerca de la pared</li> </ul>
2 Ecuaciones		
Estándar $k - \epsilon$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo más sencillo para representar la variación de la longitud de la turbulencia y las escalas de velocidad</li> <li>• Excelente rendimiento para muchos flujos industriales</li> <li>• Apropiado para altos números de Reynolds</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asume la viscosidad del remolino como isotrópico</li> <li>• Mal desempeño para flujos no confinados, flujos rotativos, conductos no circulares y capas límite curvas</li> </ul>
RNG $k - \epsilon$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se desempeña mejor para algunos flujos con grandes remolinos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asume la viscosidad del remolino como isotrópico</li> <li>• No ha sido suficientemente validado hasta el momento</li> </ul>
Estándar $k - \omega$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Excelentes pronósticos del fluido cerca de la pared</li> <li>• Mejores predicciones bajo gradiente de presión adverso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Malas predicciones del comportamiento del fluido lejos de la pared</li> </ul>
SST $k - \omega$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiene en cuenta anisotropía</li> <li>• Proporciona predicciones precisas del inicio y cantidad de separación de flujo bajo gradientes de presión anversos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere un alto esfuerzo computacional</li> </ul>
6 Ecuaciones		
Reynolds Stress Models (RSM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiene en cuenta anisotropía</li> <li>• Modelo más general de todos los modelos de turbulencia clásicos</li> <li>• Funciona bien para flujos complejos, incluidos los conductos no circulares y los flujos curvos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere un alto esfuerzo computacional debido a que emplea siete ecuaciones (incluyendo la de continuidad)</li> </ul>

Fuente: Modificado de: RANADE, Vivek. Computational Flow Modeling for Chemical Reactor Engineering. 1 ed. Estados Unidos: Academic Press, 2002. p. 79. ISBN 0-12-576960

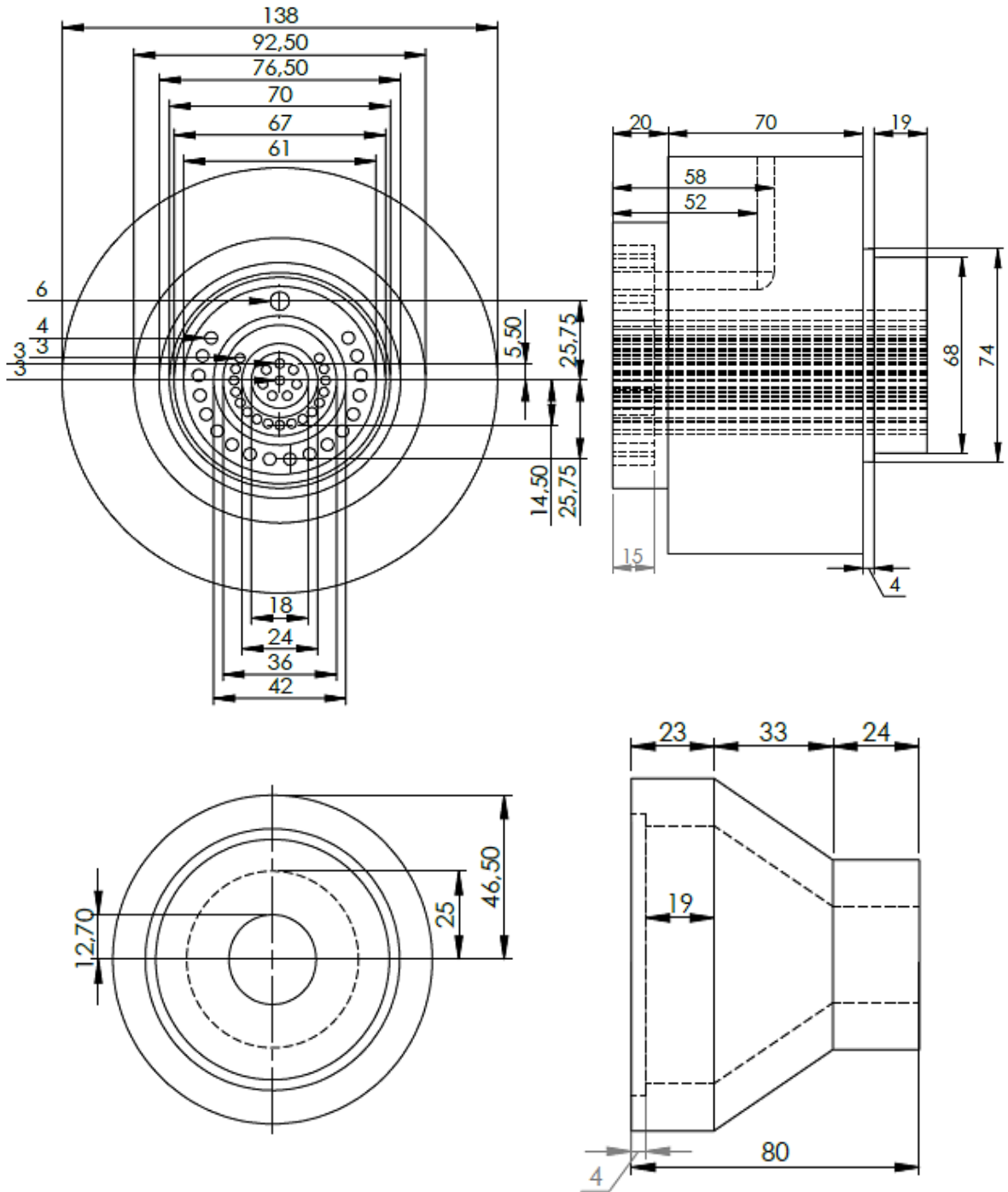
## Anexo C Planos del reactor UIS-GIMBA 2.1.

Las medidas indicadas en los planos se encuentran en milímetros.


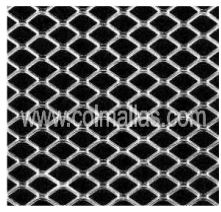
### Cabezal de entrada.



# Cabezal de Salida



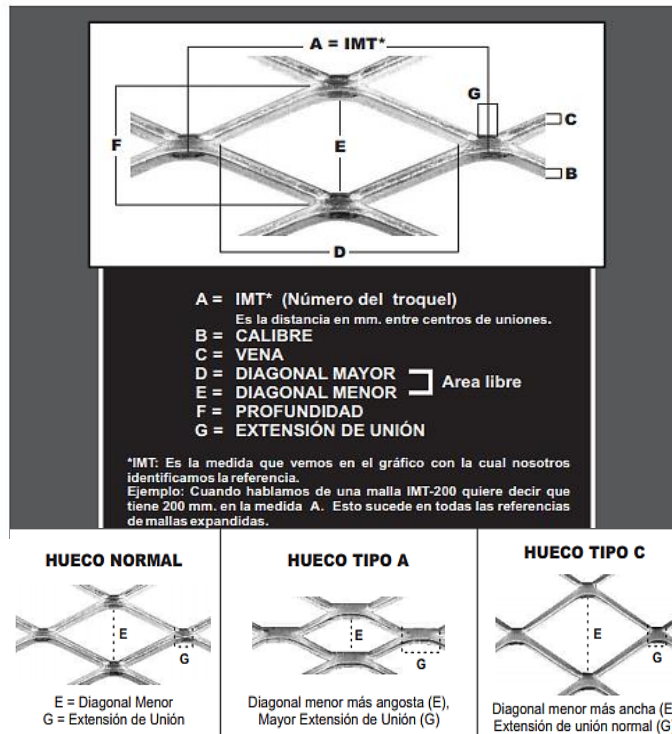
## Anexo D Características y dimensiones de los electrodos.

ÁNODO (Externa)			
Proveedor	Descripción	Dimensiones [mm]	
Soltech Ltda.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lámina sin procesar: ASTM B265 SPEC.</li> <li>Malla de Titanio.</li> <li>Material: Grado 2</li> </ul>	6 x 3 (Longitud de la diagonal del diamante).  Ancho del tronco ~0,9	
CÁTODO (Interna)			
Proveedor	Descripción	Dimensiones [mm] *	
Colamllas S.A	<ul style="list-style-type: none"> <li>Expandida en Cold Rolled.</li> <li>Material: acero 304</li> </ul>	IMT-10 (A) Calibre (B): 0,9 Diag. Mayor (D): 6,60 Diagonal menor (E): 3,70	

\*



### Especificaciones



## Anexo E Modelo de turbulencia: Reynolds Stress Models (RSM).

Bengt Andersson & Ronnie Andersson<sup>47</sup>, exponen el modelo RS el cual resuelve una ecuación de transporte para cada tensor de Reynolds. Las ecuaciones que describen el transporte de los tensores de Reynolds se pueden obtener directamente de las ecuaciones de Navier-Stokes utilizando la descomposición de Reynolds y su promedio.

Las ecuaciones de transporte completas para las tensiones de Reynolds son:

$$\begin{aligned}
 \underbrace{\frac{\partial \langle v_i v_j \rangle}{\partial t}}_I + \underbrace{\langle U_k \rangle \frac{\partial \langle v_i v_j \rangle}{\partial x_k}}_{II} = & - \underbrace{\left( \langle v_i v_k \rangle \frac{\partial \langle U_j \rangle}{\partial x_k} + \langle v_j v_k \rangle \frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial x_k} \right)}_{III} \\
 & - \underbrace{2\nu_t \left\langle \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \frac{\partial v_j}{\partial x_k} \right\rangle}_{IV} + \underbrace{\left\langle \frac{p}{\rho} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right\rangle}_V \\
 & - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} \left( \langle v_i v_j v_k \rangle + \delta_{ik} \frac{\langle v_j p \rangle}{\rho} + \delta_{jk} \frac{\langle v_i p \rangle}{\rho} - \nu_t \frac{\partial \langle v_i v_j \rangle}{\partial x_k} \right)}_{VI}
 \end{aligned} \tag{18}$$

Los términos en la ecuación (18) representan los siguientes efectos:

I. Acumulación de  $\langle v_i v_j \rangle$ .

II. Convección de  $\langle v_i v_j \rangle$  por la velocidad media.

III. La producción de  $\langle v_i v_j \rangle$ , la tasa de generación de las tensiones turbulentas por cizalla media, los grandes remolinos extraen energía de la tasa media de deformación del flujo.

IV. Disipación viscosa de  $\langle v_i v_j \rangle$ , tasa de disipación de tensiones turbulentas, por lo que la energía cinética turbulenta se transforma en calor.

<sup>47</sup> ANDERSSON, Bengt, *et al.* Computational Fluid Dynamics for Engineers. 1 ed. Estados Unidos: Cambridge University Press, 2012. p. 96-99. ISBN 978-1-107-01895-2.

V. Correlación presión-deformación, que proporciona redistribución entre las tensiones de Reynolds.

VI. Los términos de transporte, todos los términos, excepto el último, que es la difusión molecular, representan el transporte turbulento.

La ecuación (18) puede escribirse en la siguiente notación abreviada:

$$\frac{\partial \langle v_i v_j \rangle}{\partial t} + \langle U_k \rangle \frac{\partial \langle v_i v_j \rangle}{\partial x_k} = P_{ij} - \varepsilon_{ij} + \phi_{ij} + d_{ij} \quad (19)$$

La interpretación física de la ecuación (19) es que las tensiones individuales se generan, se disipan y se disipan a diferentes velocidades. Por lo tanto, el modelado está en un nivel fundamental más alto que el enfoque de obtener una viscosidad turbulenta. En consecuencia, no se necesita la hipótesis de viscosidad turbulenta, lo que elimina una de las principales deficiencias de los modelos que emplean dos ecuaciones. La principal diferencia entre la energía cinética turbulenta ( $k$ ) y las ecuaciones de esfuerzo es el término  $V$ , que no tiene equivalencia con los otros modelos. Este término se denomina término presión-deformación o presión-aleatorización. El término actúa para redistribuir la energía turbulenta de un componente de estrés a otro. Este concepto se puede mostrar a través de una suma de las ecuaciones para las tensiones normales mediante el uso de la continuidad de los elementos diagonales.

$$\phi_{ij} = \left\langle \frac{p}{\rho} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right\rangle \quad (20)$$

Esto significa que, si la tensión normal en una dirección es menor que en la otra dirección, recibirá energía a través de  $\phi_{ij}$ . Por lo tanto, este proceso puede considerarse como redistributivo, tendiendo a devolver la turbulencia a un estado isotrópico, sin influencia directa en el nivel de energía de turbulencia.

La ecuación (18) proporciona seis ecuaciones para las tensiones de Reynolds. Tenga en cuenta que los términos I, II y III son exactos, ya que solo contienen los esfuerzos de Reynolds y las tensiones medias. Excepto los primeros tres términos, todos los demás términos deben ser modelados. En realidad, es posible derivar un conjunto de ecuaciones para las incógnitas. Sin embargo, esto simplemente introducirá términos de orden superior que requieren cierre. Por lo tanto, en algún nivel, los modelos de turbulencia deben ser introducidos para cerrar el conjunto de ecuaciones.

Los términos disipativos se modelan suponiendo que son isotrópicos, ya que estos ocurren en escalas más pequeñas,

$$\varepsilon_{ij} = 2\nu_t \left\langle \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \frac{\partial v_j}{\partial x_k} \right\rangle = \frac{2}{3} \varepsilon \delta_{ij} \quad (21)$$

Aquí la disipación de energía,  $\varepsilon$ , se obtiene de su propia ecuación de transporte.

Las contribuciones de las interacciones de turbulencia-turbulencia y de las cepas medias generalmente se toman en cuenta al modelar el término presión-deformación como:

$$\Phi_{ij} = \left\langle \frac{p}{\rho} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right\rangle = \Phi_{ij1} + \Phi_{ij2} \quad (22)$$

Aquí,  $\Phi_{ij1}$  es el término de baja presión-deformación que sirve para redistribuir la energía entre las tensiones de Reynolds y  $\Phi_{ij2}$  es el término de presión-deformación rápida que contrarresta la producción de anisotropía. El término que da un retorno a la isotropía, o el término de presión-deformación lenta,  $\Phi_{ij1}$ , se modela como:

$$\Phi_{ij1} = -c_1 \varepsilon \left( \frac{\langle v_i v_j \rangle}{k} - \frac{2}{3} \varepsilon \delta_{ij} \right) \quad (23)$$

y el término de presión-tensión rápida,  $\phi_{ij2}$ , se modela como:

$$\phi_{ij1} = -c_2 \left( P_{ij} - \frac{2}{3} P_{kk} \delta_{ij} \right) \quad (24)$$

donde:

$$P_{ij} = - \left( \langle v_i v_k \rangle \frac{\partial \langle U_j \rangle}{\partial x_k} + \langle v_j v_k \rangle \frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial x_k} \right) \quad (25)$$

Los términos de transporte turbulento a menudo se modelan sobre la base de una hipótesis de difusión de gradiente

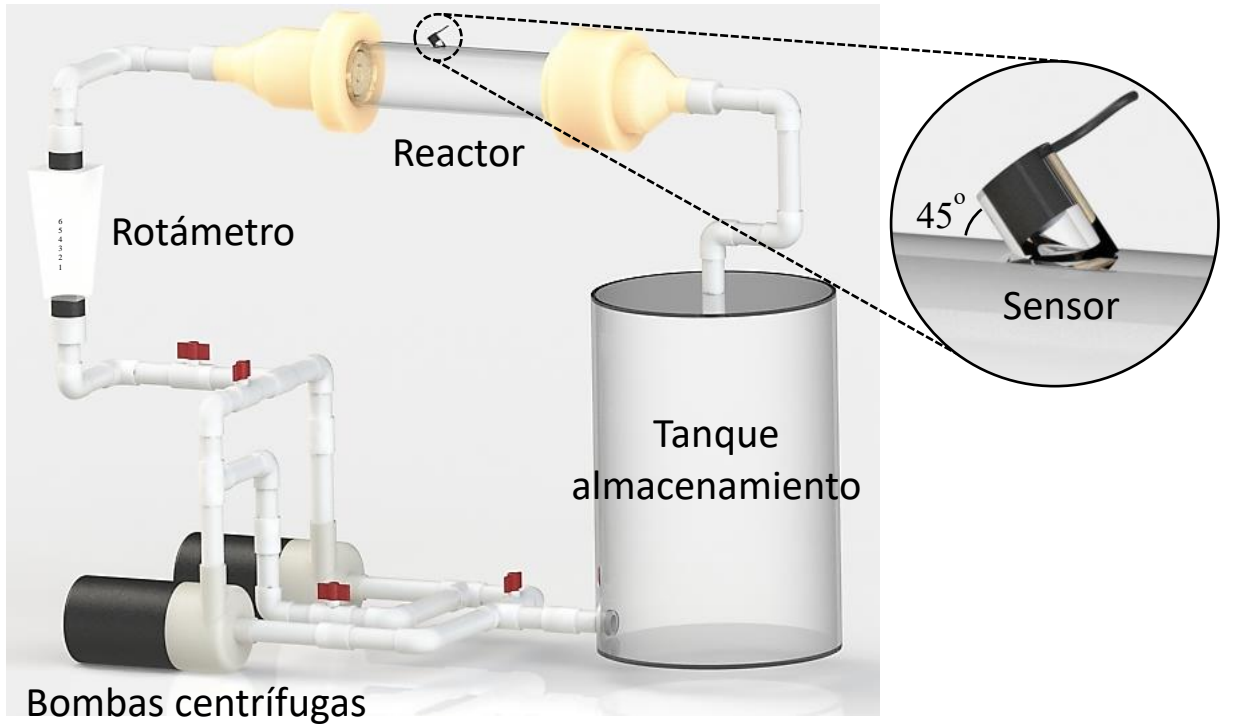
$$\langle v_k \phi \rangle \propto - \frac{k}{\varepsilon} \langle v_k v_l \rangle \frac{\partial \phi}{\partial x_l} \quad (26)$$

y suponiendo una difusión de presión insignificante. Por lo tanto, el término se modela como:

$$\begin{aligned} d_{ij} &= - \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \langle v_i v_j v_k \rangle + \delta_{ik} \frac{\langle v_j p \rangle}{\rho} + \delta_{jk} \frac{\langle v_i p \rangle}{\rho} - v_t \frac{\partial \langle v_i v_j \rangle}{\partial x_k} \right) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_k} \left( c_s \frac{k}{\varepsilon} \langle v_k v_l \rangle \frac{\partial \langle v_i v_j \rangle}{\partial x_l} \right) \end{aligned} \quad (27)$$

Tenga en cuenta que es una buena práctica incluir términos de corrección de pared en las ecuaciones modeladas para tener en cuenta los efectos de la reflexión de la pared. Tenga en cuenta también que se resuelve una ecuación de transporte adicional para la tasa de disipación de energía. Por lo tanto, tenemos un conjunto de ecuaciones solucionables, por ejemplo 11 ecuaciones para 11 incógnitas,  $\langle U_i \rangle$ ,  $\langle v_i v_j \rangle$ ,  $\langle P \rangle$  y  $\varepsilon$ .

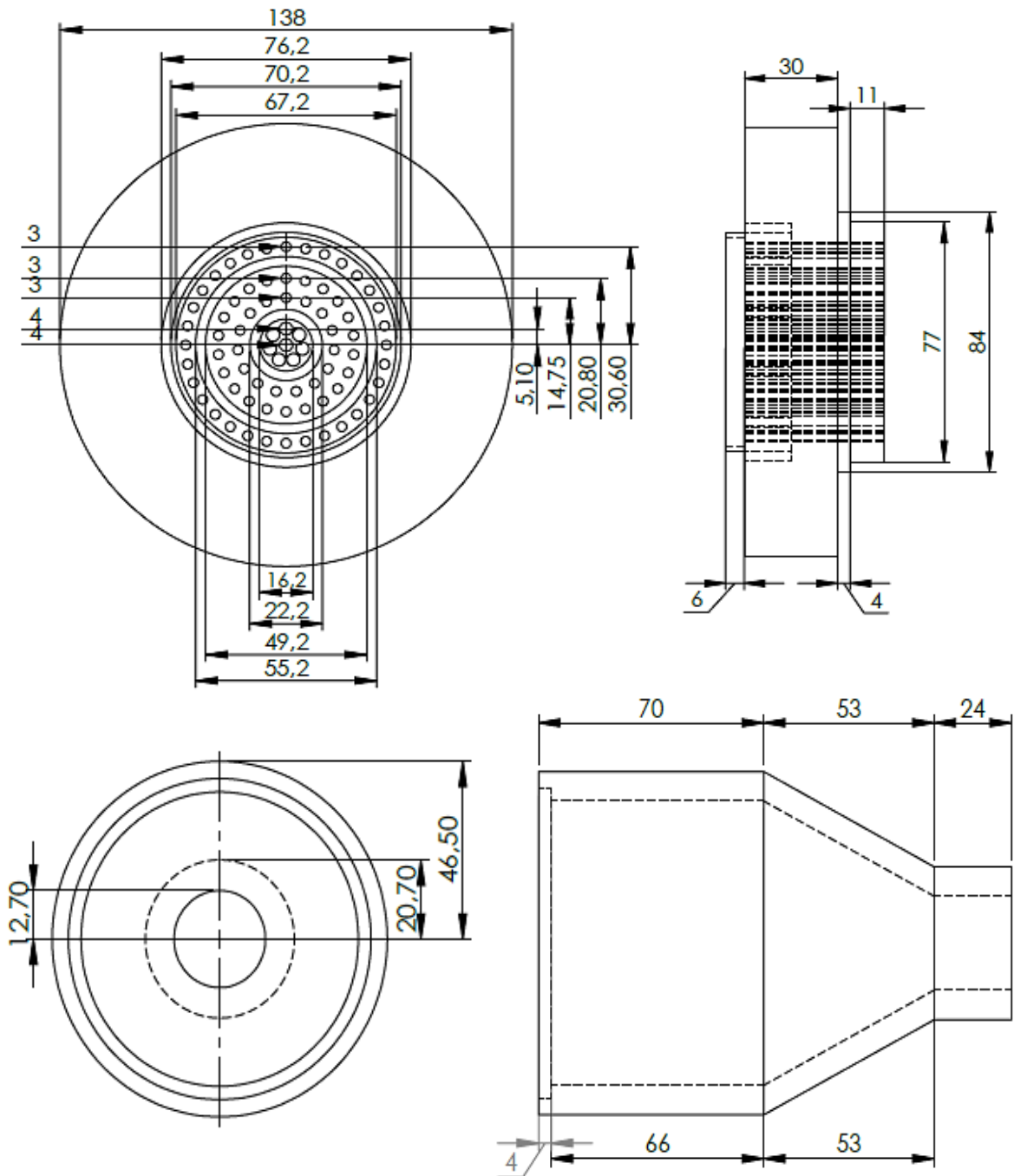
**Anexo F Esquema del montaje experimental.**



## Anexo G Planos del reactor UIS-GIMBA 2.2

Las medidas indicadas en los planos se encuentran en milímetros.

### Cabezal de entrada.



Cabezal de salida.

