

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**RELACIÓN ENTRE EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR
(HTC) Y LA VELOCIDAD DE AGITACIÓN EN QUENCHOTEST**

POR

JOSÉ ANTONIO GUZMÁN SANTANA

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

MAYO, 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**RELACIÓN ENTRE EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR
(HTC) Y LA VELOCIDAD DE AGITACIÓN EN QUENCHOTEST**

POR

JOSÉ ANTONIO GUZMÁN SANTANA

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, MÉXICO

MAYO DE 2019

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELECTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del comité de Tesis recomendamos que la Tesis “Relación entre el coeficiente de transferencia de calor (HTC y la velocidad de agitación en Quenchtost” realizado por el alumno José Antonio Guzmán Santana, con número de matrícula 1887259, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.

El Comité de Tesis



Dr. Luis Leduc Lezama

Asesor



Dr. Rafael Mercado Solís

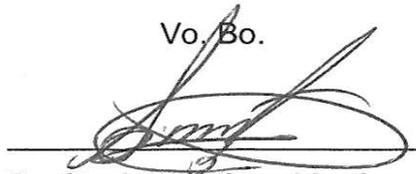
Revisor



Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez

Reviso

Vo. Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirección de Estudios de Posgrado



AGRADECIMIENTOS

*No importa si alguien, alguna que otra vez, las dijo sin sentirlo.
Yo, sinceramente, ni siquiera con el universal y expresivo lenguaje de la música, creo
posible hacer llegar mi agradecimiento a todo el que lo merece. Siempre quedaré
inconforme, siempre quedaré en deuda, y siempre pensaré que la tesis que hoy presento
no paga la más mínima fracción de lo que hicieron por mí.
abarcando a todos y mencionando a algunos en particular:
A los que están y a los que no (que de todos modos permanecen).
A mi familia (las cuatro patas de mi mesa, mi apoyo).
A mi esposa (por ayudarme a cerrar esta y por querer abrir conmigo la próxima página
de mi vida).
A mis maestros y tutores (los que mantienen encendido mi intelecto, mi ingeniería).
A Beto Pérez (él sabe por qué)
A mis asesores Luis Leduc, Rafael Mercado y Edgar Saldaña por demostrarme
sobremedida el sentido más práctico del punto de vista ingenieril/profesional.
A la Facultad de Química de la UNAM, especialmente al Dr. Marco Ramírez y Enrique
Jardón, por permitirme realizar experimentos en sus instalaciones y por todo su apoyo.
A mi segunda alma mater (la UANL y por ende FIME).
A mis entrañables (con los que compartí la 2da casa).
A mi juventud aprovechada (que está haciendo presente).
A mis compañeros de sacrificio (que se ganaron mi estima, mi mano amiga, mi
incondicionalidad).
A mi patria, CUBA y al México lindo y querido que me adoptó. (por tener ambos una
cantera de HUMANOS que marcan la diferencia a pesar de sus errores).
Al CONACYT por su infinito apoyo.
A la inspiración de los ingenieros (creadores de maravillas monumentales de nuestro
tiempo).
A mis pasiones (que en su momento me ayudaron a aliviar el estrés, mi refugio).
A eso que me guía que cada vez se hace más notorio.
A ustedes.*

*Este trabajo está dedicado a mis padres, los responsables de
impulsarme a todo lo que soy y conozco.
A mi hermano, innegable sangre de mi sangre.
A mi esposa por realizar esta travesía junto a mí, por traducir lo
malo y lo bueno al lenguaje del amor y por velar que mis
sentimientos permanezcan puros y sinceros.
A NINITA por ser la abuela que siempre me consintió.
A mi abuela MAMI, ejemplo de lo que conozco como madre de
familia, la idea desde muy pequeño que el trabajo ennoblece.
Y a la memoria de mi abuelo APA, un tutor desde la infancia, el
que encendió la chispa y me dio un ejemplo a seguir como persona,
a ti que aún vives en mí.*

CONTENIDO

RESUMEN.....	XI
INTRODUCCION GENERAL.....	12
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	12
2. REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	14
3. HIPÓTESIS.....	14
4. OBJETIVOS.....	15
ANTECEDENTES.....	16
1. MEDICIONES EXPERIMENTALES A TRAVES DE VELOCIMETRIA DE IMAGENES DE PARTICULAS (PIV).....	16
2. DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.....	16
3. MEDICIONES EXPERIMENTALES A TRAVES DEL QUENCHOTEST 21	
METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	23
1. EXPERIMENTOS PIV.....	23
1.1 SETUP EXPERIMENTAL.....	23
1.2 ADQUISICION DE IMAGENES.....	28
1.3 PROCESAMIENTO DE IMAGENES A TRAVES DE DYNAMICS STUDIO® 2015.....	30
1.4 UTILIZACION DE MATLAB PARA POSTPROCESAR RESULTADOS DEL PIV.....	31
2. SIMULACION CFD A TRAVES DE ANSYS® FLUENT®.....	32
2.1 MODELO GEOMETRICO.....	34
2.2 MALLADO.....	37
2.3 SETUP EN ANSYS FLUENT.....	45

2.4	POSTPROCESAMIENTO EN CFD-POST	51
3.	EXPERIMENTOS QUENCHOTEST	59
3.1	PROCEDIMIENTO DE MEDICION	59
3.2	PROCESAMIENTO DE DATOS OBTENIDOS (PRIMERA FASE)...	61
3.3	PROCESAMIENTO DE DATOS OBTENIDOS (SEGUNDA FASE) .	63
	RESULTADOS.....	66
1.	VELOCIMETRIA DE IMÁGENES DE PARTICULAS (PIV).....	66
1.1	IMÁGENES DE LOS CAMPOS VECTORIALES	66
1.2	ARCHIVOS CON INFORMACION DE POSICIONES Y VELOCIDADES DE LOS CAMPOS VECTORIALES DE LOS CORTES EN FORMATO *.CSV	76
1.3	RESULTADOS DE MATLAB	77
1.4	CONTORNOS DE VELOCIDAD CREADOS CON MATLAB®	78
2.	SIMULACIONES CFD	79
2.1	ZONA 1	79
2.2	ZONA 2	88
2.3	UNIFICACION DE ZONAS.....	99
3.	EXPERIMENTOS QUENCHOTEST	106
3.1	RESULTADOS DE LA PRIMERA FASE	106
3.2	RESULTADOS DE LA SEGUNDA FASE.....	108
	DISCUSION.....	111
1.	VELOCIMETRIA DE IMÁGENES DE PARTICULAS (PIV).....	111
1.1	COMPARACION ENTRE LAS IMÁGENES DE VECTORES EXPORTADAS POR DYNAMICS STUDIO® 2015 Y LAS OBTENIDAS POR SIMULACIÓN NUMÉRICA EN MATLAB®	111

1.2	COMPARACION DE VELOCIDADES EN LAS INTERSECCIONES DE LOS CORTES.....	113
2.	PIV VS FLUENT	119
2.1	COMPARACION ENTRE CONTORNOS DE VELOCIDAD DE MATLAB Y FLUENT	119
2.1	COMPARACION ENTRE IMÁGENES DE VECTORES DE PIV Y FLUENT.....	120
2.2	ERRORES DE MEDICION ENTRE PIV Y FLUENT EN LAS LINEAS DE INTERSECCION DE LOS CORTES.....	120
3.	FLUENT.....	122
2.1	LÍNEAS DE ANÁLISIS.....	122
2.2	PUNTOS DE ANALISIS	125
2.3	COMPORTAMIENTO DEL FLUIDO EN LA VECINDAD DE LA PROBETA.....	126
4.	RESULTADOS DEL QUENCHOTEST	129
3.1	CURVAS DE ENFRIAMIENTO Y RAZON DE ENFRIAMIENTO....	129
3.2	ESTIMACION DEL HTC.....	132
3.3	RELACION ENTRE LA VELOCIDAD DE AGITACION Y HTC.....	133
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	137
1.	CONCLUSIONES	137
2.	RECOMENDACIONES.....	138
	BIBLIOGRAFIA.....	140
	INDICE DE FIGURAS.....	145
	INDICE DE TABLAS	154
	APENDICES	155
	APENDICE A. COMPONENTES DEL EXPERIMENTO PIV	155

APENDICE B. IMAGENES DE LOS CORTES TOMADAS CON LA CAMARA	158
APENDICE C. IMÁGENES DE VECTORES EXPORTADAS POR EL DYNAMICS STUDIO® 2015	160
1. CORTE PROPELA 1 MM BAJO	160
2. CORTE BARRA 10 MM BAJO	161
3. CORTE BARRA 10 MM SOBRE	163
4. CORTE DER 10 MM	164
5. CORTE DER CENT	166
6. CORTE IZQ 10 MM	167
7. CORTE IZQ CENT	169
8. CORTE MEDIO 10 MM SOBRE	170
9. CORTE MEDIO 10 MM BAJO	172
APENDICE D. IMÁGENES DE VECTORES EXPORTADAS POR ANSYS® FLUENT®	174
1. CORTE PROPELA 1 MM BAJO	174
2. CORTE BARRA 10 MM BAJO	175
3. CORTE BARRA 10 MM SOBRE	176
4. CORTE DER 10 MM	177
5. CORTE DER CENT	179
6. CORTE IZQ 10 MM	181
7. CORTE IZQ CENT	183
8. CORTE MEDIO 10 MM SOBRE	185
9. CORTE MEDIO 10 MM BAJO	186
APENDICE E. CONTORNOS DE VELOCIDAD CREADOS CON MATLAB®	187

1.	CORTE PROPELA 1 MM BAJO	187
2.	CORTE BARRA 10 MM BAJO	187
3.	CORTE BARRA 10 MM SOBRE	188
4.	CORTE DER 10 MM	188
5.	CORTE DER CENT	189
6.	CORTE IZQ 10 MM	189
7.	CORTE IZQ CENT	190
8.	CORTE MEDIO 10 MM BAJO	190
9.	CORTE MEDIO 10 MM SOBRE	191
APENDICE F. CONTORNOS DE VELOCIDAD EXPORTADOS POR ANSYS® FLUENT®		192
1.	ZONA 1 A 1000 RPM	192
2.	ZONA 2 A 1000 RPM	196
3.	ZONA 2 A 600 RPM	200
4.	ZONA 2 A 200 RPM	205
APENDICE G. ARCHIVOS CON INFORMACION DE POSICIONES Y VELOCIDADES DE LOS CAMPOS VECTORIALES DE LOS CORTES EN FORMATO *.CSV (76)		210
APENDICE H. REPORTES COMPARATIVOS DE CURVAS DE ENFRIAMIENTO/RAZON DE ENFRIAMIENTO		211
APENDICE I. REPORTES DEL CÁLCULO DE HTC (133)		217

RESUMEN

Debido a la alta demanda de equipos de alto desempeño, las tecnologías de tratamiento térmico enfocadas en la creación de piezas de acero han tenido que evolucionar. Para lograr esto, mucho se ha logrado en la disminución de las distorsiones durante el temple, la fragilización de las piezas y la optimización del medio de temple para mejorar la eficiencia de la extracción de calor de las piezas. Con esta investigación se logra establecer una relación directa entre el coeficiente de transferencia de calor (HTC) y la velocidad de agitación, a través de la caracterización del fluido en el experimento QuenchoTest con la herramienta PIV. Posteriormente se validan los campos vectoriales con simulaciones CFD a través del software FLUENT mostrando que ambas herramientas son completamente compatibles con un error mínimo si tenemos en cuenta que están en el orden de 10^{-2} . También se realizan experimentos en el QuenchoTest a las 3 velocidades de 200, 600 y 1000 rpm cuyos valores son utilizados para crear las gráficas de correlación entre la velocidad de agitación y el HTC. Finalmente se puede afirmar que con este trabajo se sientan las bases y los límites para la creación de un modelo a escala que sirva para obtener el valor del HTC en un tanque de temple industrial específico.

INTRODUCCION GENERAL

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Hoy en día, debido a la gran demanda de tecnologías y equipos de alto desempeño, la ciencia y la tecnología han tenido que dar grandes pasos en la búsqueda de soluciones a través de nuevos métodos de I + D + i. Los ingenieros, siendo la clave en este proceso, de una manera u otra han logrado generar productos más competitivos cada día y con propiedades mecánicas, químicas o físicas que cumplen con los requisitos del usuario final. En el caso de la industria del acero, un material cuyo rendimiento y versatilidad justifica el aumento de la producción de este a través de los años, una buena parte de él va de la mano con la tecnología de tratamiento térmico que le otorga las propiedades finales al material. Como se puede inducir, esto está relacionado con la transferencia de calor del material al baño de agua o aceite o cualquier otra mezcla más eficientemente calculada para este propósito. Está demostrado que los valores más altos de dureza se obtienen con enfriamientos más rápidos desde la temperatura de austenización. Los grandes problemas con estas tecnologías son; las piezas que resultan blandas después de haber sido tratadas, debido a las variables del proceso no controladas, las cuales deben ser reprocesadas; las que se fracturan debido a la severidad del enfriamiento provocado por bordes con filos o diámetros interiores muy pequeños sin radios de redondeo en piezas grandes y las que aparentemente cumplen con los requisitos, pero cuando se realiza el proceso de mecanizado y demás ensayos no destructivos muestran valores que no cumplen los requisitos mecánicos o presentan ruido en el interior por posible fragilidad del material. Además de haber piezas con pandeo u ovalamiento provocado por distorsiones en el temple.

Muchas investigaciones han demostrado que cuando la temperatura del agua de enfriamiento y la velocidad de agitación varían, el valor de la velocidad de enfriamiento también varía. Además, varias correlaciones entre la tensión de

corte y el flujo de calor superficial han ayudado a la industria a optimizar los procesos de enfriamiento.

Se han realizado varios estudios para calcular experimentalmente el coeficiente de transferencia de calor (HTC) en los tanques de tratamiento térmico, pero pocas investigaciones se han centrado en obtener estos valores en función de la velocidad de agitación simulada por Dinámica de Fluidos Computarizada (CFD) y por Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV).

El método CFD es el que caracteriza los fluidos completamente de acuerdo con las ecuaciones de conservación:

- La ecuación de conservación de masas.
- La ecuación de conservación del momento.
- La ecuación de conservación de energía.

Estas ecuaciones deben resolverse de acuerdo con el caso y son las que nos proporcionan el comportamiento de todo el fluido, en este caso el comportamiento de los vectores de velocidad del agua en los tanques de enfriamiento.

Por otro lado, el método PIV utiliza un láser que traza un polímero micrométrico que se inserta en el agua y se acopla a una cámara de alta velocidad que, junto con el software correspondiente, trabajan en conjunto para caracterizar todo el comportamiento del fluido.

Debido a las cuestiones anteriores, este trabajo se centra en la simulación del comportamiento del fluido a través de CFD en el Quenchttest (experimento Tensi) para funcionar como un modelo a escala de los tanques de enfriamiento que están presentes en las diferentes industrias. Después de esto, se realizarán algunas mediciones experimentales a través de la técnica denominada PIV, donde se adquieren los campos de velocidad en forma vectorial para validar los obtenidos a partir de CFD. Una vez que se cree la correlación entre estos dos métodos, se realizarán ensayos en el Quenchttest para predecir los valores de HTC y modelar las velocidades de enfriamiento a las que se someten las probetas con el objetivo de sentar las bases para una futura investigación de doctorado

que aplique los métodos empleados en la realización de esta tesis a nivel industrial.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

[1] Reportaron el flujo de fluidos en un tanque de temple con agitación durante el tratamiento térmico de superaleaciones. Esto se realizó a través de las técnicas de análisis de imágenes o LDA para registrar los patrones de flujo y las velocidades en puntos específicos. Posteriormente se compararon estos experimentos con simulaciones computacionales a través del software Fluent.

[2] Realizaron un estudio donde una probeta de aluminio 6061 fue templada en agua destilada variando la temperatura del baño y la velocidad de agitación, el análisis del factor de temple fue cuantizado para evaluar la severidad del temple. Los datos mostraron un incremento en la tasa de enfriamiento mientras se elevaba la velocidad de agitación.

[3] Propusieron una simulación numérica para obtener una correlación entre el esfuerzo cortante y el flujo de calor en la superficie, para un segmento de la industria automotriz, donde se identifican los potenciales mejoras de los grandes tanques de tratamiento térmico.

3. HIPÓTESIS

Es posible obtener una correlación entre el HTC y la velocidad de agitación, si las mediciones experimentales de velocidad (PIV) son validadas por los modelos obtenidos por simulación computacional (CFD).

4. OBJETIVOS

- Caracterizar el flujo de fluidos en el Quencho-test a través de la determinación experimental de velocidades con la Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV)
- Realizar simulaciones CFD del campo de velocidades del Quencho-test en función de la velocidad de agitación.
- Comparar y validar resultados obtenidos por las técnicas PIV y CFD.
- Obtener una correlación entre HTC y la velocidad de agitación.

ANTECEDENTES

1. MEDICIONES EXPERIMENTALES A TRAVES DE VELOCIMETRIA DE IMAGENES DE PARTICULAS (PIV)

La velocimetría de imágenes de partículas (PIV por sus siglas en inglés) es un método óptico de visualización que permite obtener el campo de velocidades de flujos de manera instantánea y con alta resolución espacial. Por la naturaleza de la técnica el fluido debe ser dopado con un polímero que funcione como trazador para el seguimiento de las trayectorias del mismo al ser iluminado con un láser de alta intensidad. El método se basa en determinar sobre la base de dos imágenes capturadas con una cámara de alta velocidad en un intervalo de tiempo conocido, el desplazamiento de las partículas introducidas en el flujo, obteniendo así su magnitud dirección y sentido. Esta técnica no es intrusiva en la mayoría de los casos, lo cual permite realizar mediciones sin perturbar el flujo, a menos que las partículas introducidas tengan una densidad diferente a la del agua. El desarrollo de esta técnica en los últimos años ha permitido su aplicación en la caracterización de flujos complejos logrando un avance notable en el campo de la mecánica de los fluidos. [4]

2. DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

Debido a la necesidad actual de mejorar sistemas y mecanismos en cuanto a eficiencia del flujo de fluidos que actúa sobre él y con el aumento del poder de cálculo gracias a las computadoras, el campo de la dinámica de fluidos computacional se convirtió en una herramienta crítica para generar soluciones. El método CFD se basa en un análisis del flujo de fluidos en un sistema de acuerdo con sus propiedades físicas; como la velocidad, la presión, la

temperatura, la densidad y la viscosidad, para generar virtualmente una solución sin comprometer la precisión y exactitud de los resultados.

Específicamente hablando, un sistema se puede entender como un volumen de control para el cual será necesario definir un modelo matemático del caso físico y un método numérico ensamblados en una herramienta de software para analizar el flujo de fluidos. Por eso surgió la necesidad de agrupar un grupo de leyes que se debían cumplir para que el cálculo fuera correcto, las llamadas ecuaciones de conservación, las cuales serán el modelo matemático del caso físico. De esta forma quedan descritos los cambios en todas esas propiedades físicas para el flujo de fluidos y la transferencia de calor. Este modelo varía en dependencia del caso de estudio, teniendo o no transferencia de calor, transferencia de masa, cambio de fase, o siendo una reacción química. Además, la fiabilidad de un análisis de CFD depende en gran medida de cómo se preprocesa el problema. La verificación del modelo matemático es extremadamente importante a la hora de crear un caso preciso para resolver el problema, además, la determinación de métodos numéricos adecuados para generar un camino a través de la solución es tan importante como un modelo matemático, así como la definición de fronteras o condiciones de contorno. El software con el que se realiza el análisis es uno de los elementos clave para generar un proceso de cálculo eficaz, ya que cada uno de los paquetes computacionales disponibles actualmente están especializados en unas áreas más que en otras, aunque algunos ya alcanzan casi todos los fenómenos de la naturaleza, como los módulos del paquete ANSYS®.

Analizando un poco la historia, se encuentran resultados que verifican que desde la antigüedad el ser humano a estado estudiando el fenómeno de los fluidos, pero debido a la gran cantidad de cálculos y definiciones matemáticas que presupone esta ha tenido un freno importante, quedándose en meras ecuaciones complejas y arrojando análisis muy modestos. Es por eso que a mediados del siglo pasado con el surgimiento de los primeros equipos de cómputo se logró hacer buenos avances en el cálculo de vorticidad como primer análisis transitorio de un flujo incompresible usando las ecuaciones de Navier-Stokes en los

laboratorios de Los Álamos en Estados Unidos. Posteriormente varios códigos comerciales se fueron creando a medida que las grandes empresas se empezaron a dar cuenta del gran uso que pueden tener en la mejora y optimización de formas y sistemas en general.

ECUACIONES GOBERNANTES

La distribución principal de los análisis de fluidos está dirigida por ecuaciones que se basan en la ley de conservación de las propiedades físicas de los fluidos. Las ecuaciones básicas son las tres leyes físicas de conservación:

- **Conservación de la masa:** ecuación de continuidad.
- **Conservación de momentum:** ecuación de momento de la segunda ley de Newton.
- **Conservación de la energía:** primera ley de la termodinámica o ecuación de la energía.

Con estos principios se establece que la masa, el momento y la energía deben conservarse de forma estable en un sistema, es decir, lo mismo que entra, debe salir en otro lugar.

Las tres incógnitas que deben obtenerse de forma simultánea en un análisis de flujo de fluidos con cambios térmicos son la velocidad v , la presión p y la temperatura absoluta T (en caso de no ser un análisis isotérmico). Aunque p y T son las dos variables independientes principales, la forma final de las ecuaciones gobernantes también contiene otras cuatro variables termodinámicas; densidad ρ , la entalpía h , así como la viscosidad μ y la conductividad térmica k ; siendo las dos últimas, propiedades de transporte.

Analíticamente hablando, hay dos formas de determinar el modelo matemático que resolverá las ecuaciones que involucran a las variables v , p y T en todos los puntos del régimen de flujo, antes de diseñar cualquier sistema, y depende del método de observación del flujo de fluidos basado en propiedades cinemáticas. El movimiento de fluidos se puede analizar a través del método lagrangiano o

euleriano. La descripción lagrangiana del movimiento del fluido se basa en la teoría de ser un observador fijo a una partícula que viaja con el fluido a través de todo el volumen de control, la cual es lo suficientemente grande como para detectar propiedades. De ahí se deriva el análisis donde las propiedades son determinadas desde $t=0$ hasta $t=1$ por ejemplo. Y de forma más fácil, en el método euleriano, no se sigue ninguna partícula específica a través del camino, sino que se examina el campo de la velocidad en función del tiempo y la posición, o lo que es lo mismo, se fija el volumen de control y se analiza la entrada y salida del fluido como se puede observar en la Figura 1 y Figura 2

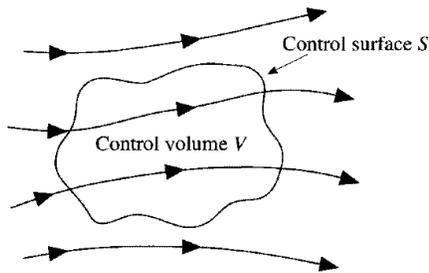


Figura 1. Enfoque euleriano

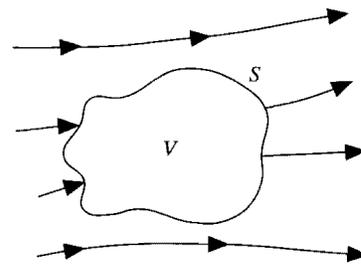


Figura 2. Enfoque lagrangiano

En base al enfoque que se adapte al problema se definen las condiciones de contorno y las ecuaciones gobernantes antes mencionadas son solucionadas para así resolver el problema planteado. Las ecuaciones se detallan a continuación.

1. Ecuación de continuidad.

- Forma integral

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \, d\Omega = - \int_{\partial\Omega} \rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) \, d(\partial\Omega)$$

- Forma diferencial

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

2. Ecuación de momentum.

- Forma integral

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \mathbf{v} d\Omega + \int_{\partial\Omega} \rho \mathbf{v} (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) d\partial\Omega = \int_{\partial\Omega} \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{n} d\partial\Omega + \int_{\Omega} \rho \mathbf{f} d\Omega$$

- Forma diferencial

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) = \rho \mathbf{f} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}.$$

3. Ecuación de la energía

- Forma integral

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \left(e + \frac{1}{2} v^2 \right) d\Omega + \int_{\partial\Omega} \rho \left(e + \frac{1}{2} v^2 \right) \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} d\partial\Omega = \int_{\partial\Omega} \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{v} d\partial\Omega + \int_{\Omega} \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} d\Omega - \int_{\partial\Omega} \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} d\partial\Omega$$

- Forma diferencial

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{1}{2} v^2 \right) = -\nabla \cdot (p \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau}' \cdot \mathbf{v}) + \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} + \nabla \cdot (k \nabla T)$$

Las otras formulaciones importantes son las que se derivan en las ecuaciones de Navier-Stokes la cuales definen el comportamiento dinámico del fluido. Aunque su formulación, análisis y solución requieren de conocimientos avanzados en matemática, estos llevan implícitos los principios de conservación los cuales devienen en soluciones prácticas con la aplicación de los enfoques antes mencionados en dependencia de la viabilidad del caso de estudio.

La ecuación ejemplo de un modelo incompresible y de densidad constante como el agua es:

$$\nabla = \hat{x} \frac{\delta}{\delta x} + \hat{y} \frac{\delta}{\delta y} + \hat{z} \frac{\delta}{\delta z}$$

Donde el miembro izquierdo representa la variación del movimiento en el tiempo o derivada convectiva y el lado derecho todo lo que realiza trabajo sobre el cuerpo como la presión, fuerza ejercida y su componente de densidad y viscosidad. Independientemente de la complejidad del caso, siempre se deben usar los diferentes modelos matemáticos para darle solución al problema y mantener en modo conservativo las ecuaciones anteriores.

3. MEDICIONES EXPERIMENTALES A TRAVES DEL QUENCHOTEST

Una de las técnicas más usadas en la evaluación de severidad de temple de distintos medios, es la llamada SmartQuench® (Quenchotest), la cual está basada en el experimento de Tensi [5]. Esta técnica es desarrollada por la empresa sueca Swerea IVF® y es un método estándar a la hora de tomar decisiones y elegir un aceite de temple o agua con polímero para el mismo fin. La finalidad que tiene el método en la presente investigación es para servir como método de comparación contra simulaciones de flujos de fluidos que se efectuarán en Ansys® Fluent®. [6]

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El principio de funcionamiento del equipo consiste en sumergir una probeta de Inconel 600®, teniendo dimensiones y material estandarizado, y que ha sido previamente calentada en un horno a una temperatura de inicio estandarizada para pruebas, en el medio a ser probado. La probeta contiene un termopar incorporado, el cual está conectado al equipo de grabación o unidad de mano, que registra el proceso temperatura-tiempo. Los datos se almacenan digitalmente y pueden ser representados gráficamente o impresos en forma tabular en papel para la presentación posterior de resultados. Este sistema permite realizar funciones tales como la obtención de curvas de enfriamiento, curvas de razón de enfriamiento, cálculo del coeficiente de transferencia de calor (HTC) y predicción

de microestructuras, además de permitir que todo esto se pueda graficar e imprimir luego de ser evaluados.

Se pueden almacenar hasta veinte mediciones en la unidad manual para su posterior transmisión a una computadora. Los datos almacenados en la unidad manual permanecen en la memoria incluso cuando se apaga la unidad manual. Los datos almacenados se transmiten por Bluetooth o por cable USB a una computadora para el mejor almacenamiento, evaluación y presentación de curvas de enfriamiento, diagramas de barras y tablas.

Esta técnica actualmente es la más usada a la hora de evaluar la severidad del temple que brinda el medio, dígase aceites, mezclas de agua con polímero o agua destilada.

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

En esta sección se explicará el procedimiento experimental realizado durante esta investigación. Lo antes planteado se llevó a cabo primeramente a través de la técnica PIV para la caracterización y obtención de vectores del flujo de fluidos comparado posteriormente con simulaciones de la misma naturaleza en el programa computacional Ansys® Fluent®. Posteriormente se realizaron experimentos en el Quenchttest con la probeta caliente para estimar los valores de HTC en la probeta, estableciendo una relación con la velocidad tangencial y por consiguiente con la velocidad de agitación del experimento. La variable independiente principal en esta serie de experimentos fue la velocidad de agitación definida como la velocidad de rotación de la propela en términos de revoluciones por minuto en tres casos; 200, 600 y 1000 rpm. Esto significa que cada experimento fue pensado para 3 casos de agitación, lo que permitió obtener resultados con cierta variación de magnitud.

1. EXPERIMENTOS PIV

1.1 SETUP EXPERIMENTAL

El arreglo usado para estas mediciones comprende un láser, una cámara de alta velocidad, un programa computacional, un sistema de posicionamiento universal, un regulador de voltaje, el dispositivo al cual se le van a hacer las mediciones y otros accesorios para complementar el setup experimental.

Antes de los experimentos, las partes involucradas fueron preparadas. El láser utilizado es el 302 de la serie LDY PIV de los láseres de LITRON® para propósitos PIV (Figura 123). Cuenta con 15 mJ por pulso con una alta tasa de repetición y es parte de los láseres del tipo Dual Head Diode Pumped Q-switched Nd: YLF. Este sistema va acoplado a un sistema cerrado con una enfriadora que facilita la disipación de calor de los cabezales del láser y a un rack de 19 pulgadas

que contiene un equipo de suministro de voltaje de 240 V donde el láser puede ser ajustado a través de una pantalla LCD en el modo “offline” o a través del modo “online” por un puerto RS232. En este caso como las imágenes necesitaban ser procesadas el equipo se configuró en el modo “online”.

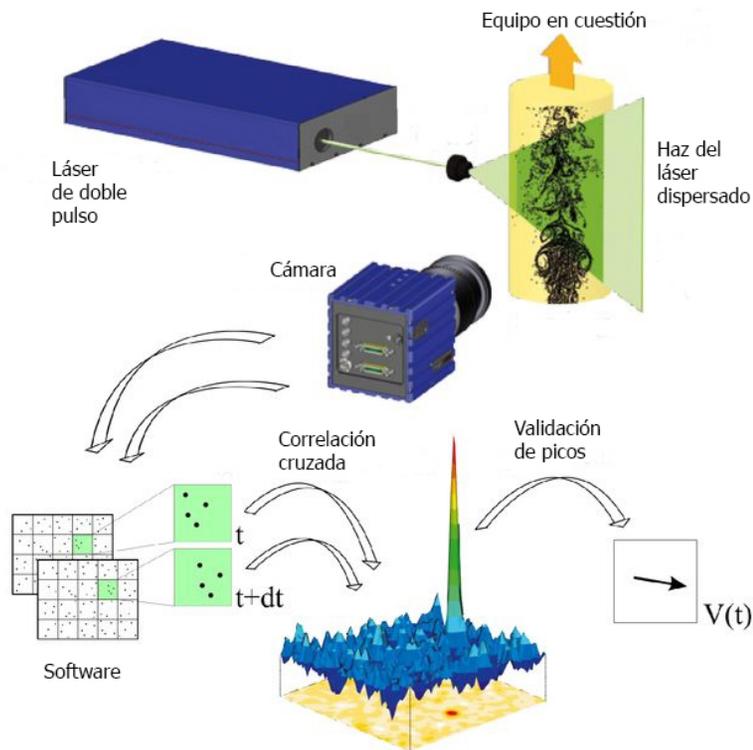


Figura 3. Representación esquemática de los experimentos.

El software que se utilizó fue el Dynamics Studio® 2015 de Dantec Dynamics® y fue la herramienta principal para la adquisición y procesamiento de las imágenes y para el control de todo el experimento. Como tiene requerimientos mínimos de 2 GB de RAM y un procesador multinúcleo, se instaló en una computadora tipo DELL PRECISION la cual fue más que capaz para estos propósitos (Figura 127). La adquisición de estas imágenes se logró a través de una cámara SpeedSense® Lab 320 (M320) de Dantec Dynamics® (Figura 124) con una velocidad de 1380 cps y un sensor CMOS de 2MP para dar una resolución de 1920x1200 con una capacidad de 12 GB de memoria en búfer. Esta cámara se configuró en el modo

automático para facilitar el control del software a través del puerto GigE Ethernet. Se utilizó un sistema de posicionamiento universal de 3 ejes de ISEL® (Figura 126), el cual tiene la ventaja de cubrir 1 m² de movimiento de base y 1,5 m² de altura de la misma forma.

En el caso del tanque de temple del experimento Quenchttest, debió ser transparente para estos propósitos pues un cambio de coloración en las paredes hubiera involucrado un fenómeno óptico de pérdida de absorbancia debido al cambio del índice de refracción del material, lo que se traduce en pérdida de intensidad del láser que provocaría un error más grande en la estimación de la trayectoria de las partículas a ser medidas. Por lo que se necesitó un tanque cuyo material fuera de acrílico o vidrio que son los más comunes y más accesibles actualmente. Como el equipo de Swerea IVF vino de una coloración algo azul (Figura 4), fue necesario construir uno de medidas similares pero transparente para los propósitos antes mencionados (Figura 125). La representación esquemática de los experimentos se puede observar en la Figura 3.



Figura 4. Tanque de temple (original de Swerea IVF®)

Una vez cumplidos estos requerimientos se realizó una limpieza completa con un paño húmedo para eliminar cada elemento que pudiera haber causado

interferencia o un error en la adquisición de las imágenes. Después de esto, el tanque se llenó con 1,5 l de agua y con 1 g de poliamida de 5 μm de diámetro para que funcione como partícula trazadora, y las burbujas restantes se eliminaron soplando aire en este lleno de agua. La caja de acrílico se hermetizó con sus respectivos tornillos.

Se necesitó una barra similar a la Inconel® 600 original para simular su posición en el tanque, en cambio, se utilizó una de acero. Como la barra de acero era demasiado brillante, se le dió un recubrimiento antirreflejante pintándola de negro para eliminar los posibles reflejos cuando el láser está encendido, este paso es fundamental para cumplir con las políticas de seguridad cuando se trabaja con láseres de alta energía, de esta manera la medición se encuentra en una configuración más controlada porque una reflexión perdida de esta naturaleza puede ser perjudicial para el cuerpo humano, causando quemaduras de alto grado y lesiones corporales.

Una vez que el dispositivo donde se realizaron las mediciones (QuenchoTest) estuvo listo, el siguiente paso fue colocarlo frente al láser y la cámara a un lado. Para los experimentos se hicieron 9 cortes de láser para así extraer y caracterizar de una mejor forma el fluido, como se muestra en la Figura 5. Por razones de organización, los cortes fueron nombrados.

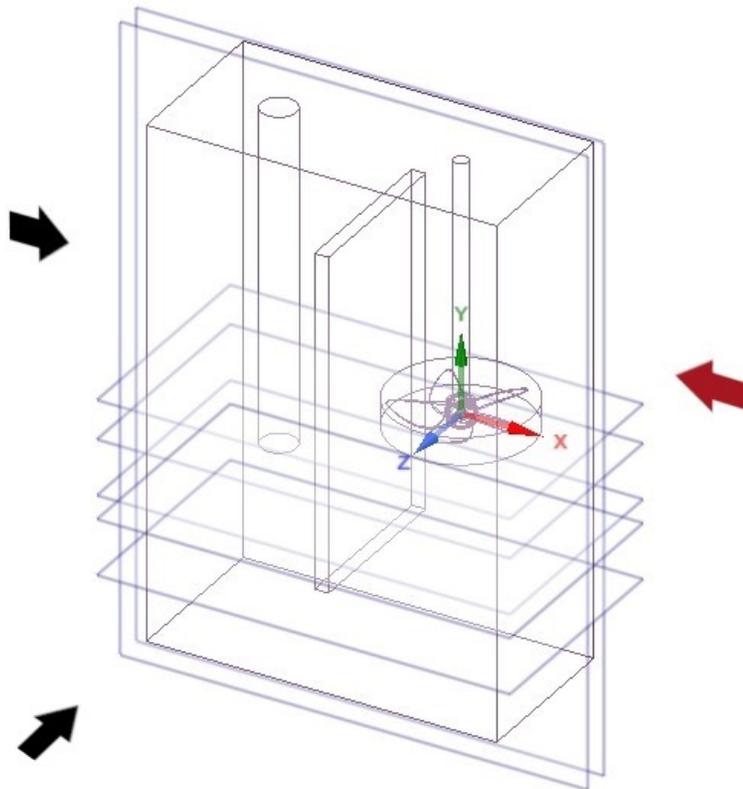


Figura 5. Cortes de láser para la extracción del comportamiento del fluido.

Tabla 1. Nombres de los cortes

1c	bajo prop 1mm
2c	barra 10 mm bajo
3c	barra 10mm sobre
4c	der 10mm
5c	der cent
6c	izq 10mm
7c	izq cent
8c	medio 10mm sobre
9c	medio 10 mm bajo

Los 4 cortes verticales se dividieron en dos partes, una proyección láser desde el lado izquierdo (flecha de la izquierda en la Figura 5) en la que la proyección corta

la mitad de la barra y la otra se mueve 10 mm hacia el frente. Los otros dos cortes son iguales, solamente rotando el experimento 180° esta vez y los cortes están en las mismas partes, en este caso, el primer contacto es con la hélice como se muestra en la Figura 5.

A lo largo del experimento, hay varias zonas de interés en las que se hizo una atención especial debido a la naturaleza del flujo y para transferencia de calor (3.3). Para este propósito, el área superficial de la barra es de interés y se analizó en todos los casos (los experimentos PIV, la simulación de CFD y el experimento Quenchtotest) en forma de una línea en el exterior de la barra (Figura 6). Es importante destacar que para una correcta alineación se midieron las distancias entre los equipos para garantizar el correcto paralelismo de las superficies.



Figura 6. Zona de interés durante el temple.

1.2 ADQUISICION DE IMAGENES

Para adquirir las imágenes, el Quenchtotest debía estar en la posición de interés como muestra la Figura 7, con la cámara y el láser a 90° si el Quenchtotest es el centro de referencia.



Figura 7. Setup experimental

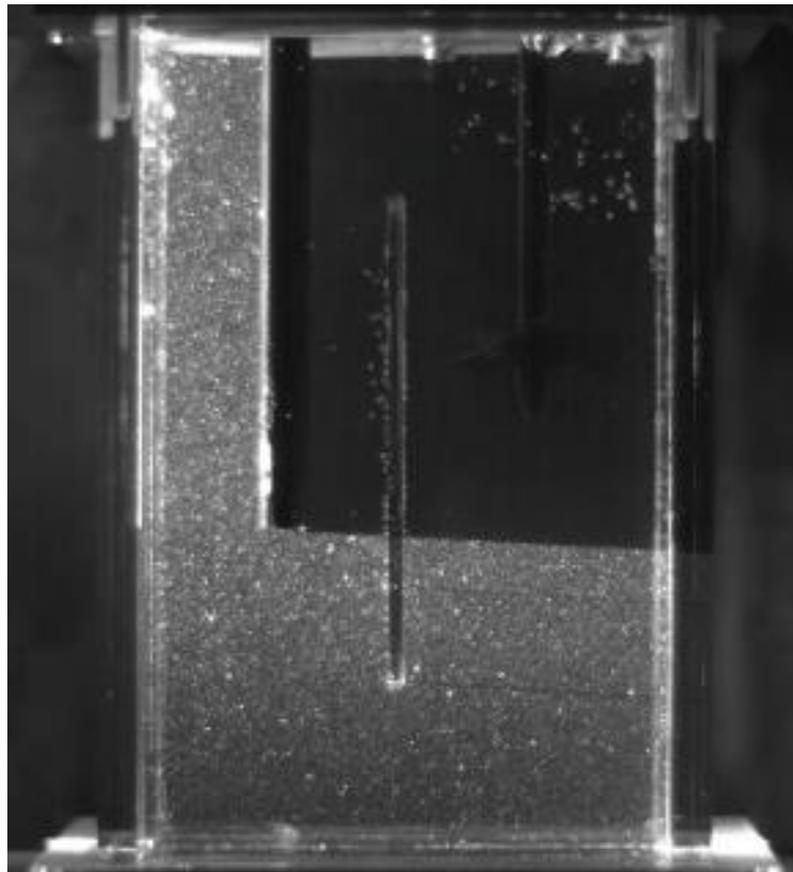


Figura 8. Imagen proyectada por la barra

Una vez que estuvo perfectamente centrado, el laboratorio se aisló completamente de la luz exterior y de cualquier interferencia luminosa. Las luces se apagaron, el láser se configuró en el 40 por ciento de su potencia e hicimos clic en vista previa en el software para verificar si el área a medir es la deseada. En la imagen de vista previa, se analizó la densidad del polímero (Figura 9) para ver si era representativa de las áreas de interrogación que se definieron. Si esto es correcto, se almacena una primera imagen para calibrar la medición con las dimensiones de una geometría conocida, en este caso el diámetro de la barra. Una vez que se realizó la calibración, se obtuvieron 1201 imágenes y se almacenaron en la computadora para su procesamiento posterior.

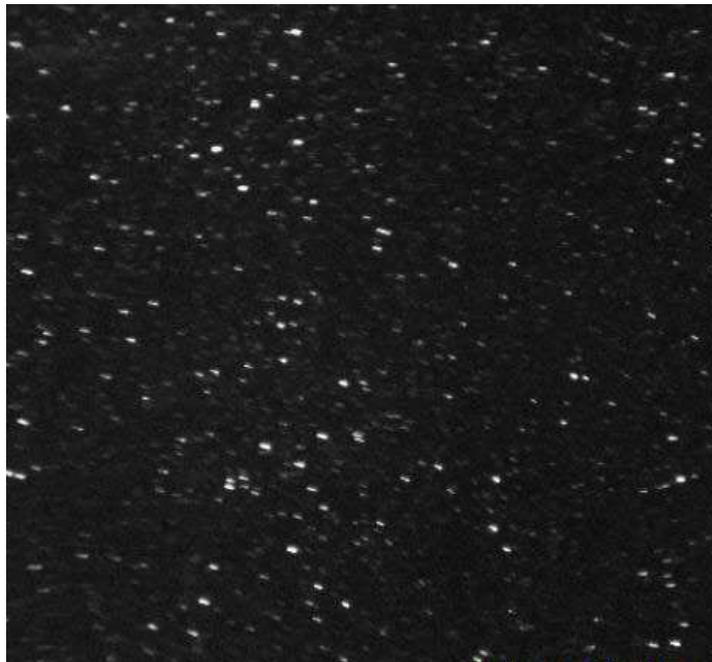


Figura 9. Densidad del polímero en el agua

1.3 PROCESAMIENTO DE IMAGENES A TRAVES DE DYNAMICS STUDIO® 2015

En la fase de procesamiento, cuando el láser se proyectó desde y hacia una zona específica (ej. lado izquierdo de la barra), hubo una zona de sombra de la cual

no pudimos tener información sobre el comportamiento del fluido que estaba detrás de la barra en este caso, como se muestra en la Figura 8. Por lo tanto, se debió hacer un enmascaramiento de imagen para descartar la zona sombreada. Una vez que se hace esto, los diferentes algoritmos del software, los cuales tienen una fuerte base estadística, se encargan de obtener las imágenes vectoriales finales. El punto de partida fue una correlación cruzada, luego una validación de picos, un filtro promedio y, finalmente, con una estadística vectorial, la forma final de la imagen de vectores se obtuvo. Otra de las bondades del software y una de las más importantes fue la posibilidad de exportar todos los datos asociados a la posición y magnitudes de los vectores en un formato universal del tipo **.csv** para su posterior postprocesamiento en hojas de cálculo. Un estimado de la precisión de estas mediciones se encuentra en la sección de RESULTADOS

1.4 UTILIZACION DE MATLAB PARA POSTPROCESAR RESULTADOS DEL PIV

Los vectores resultantes también se procesaron matemáticamente a través del programa computacional MATLAB® en su versión estudiantil, para obtener distintas propiedades del fluido.

El procedimiento a través de MATLAB® es el siguiente:

1. Primero se eliminaron las áreas de cero en la medición. Para lograr esto fue necesario leer el directorio de las carpetas que contienen los archivos **.csv**, luego crear carpetas y archivos de este mismo formato para hacer modificaciones sin perjudicar los originales, y finalmente se definieron las dimensiones de la nueva matriz de datos.
2. En segundo lugar, se hizo la definición numérica necesaria para definir máximos y mínimos en la nueva matriz de datos dejando el código preparado para el procesamiento vectorial.

3. En el tercer paso se crean archivos como x, y, u, v, V, que serán los que contendrán las matrices finales ordenadas en forma de mapas numéricos con los valores finales de la medición. Aquí se hicieron ajustes para que los vectores no tuvieran un tamaño que perjudique la correcta visualización de las imágenes. Se hicieron interpolaciones numéricas y se graficaron los vectores con un valor fijo de paso en los ejes X y Y, se escogen el tamaño, el color y el tipo de vector a ser graficado, así como la escala y los nombres de los títulos de los ejes.
4. El siguiente paso se encargaría de crear las **streamlines** o corrientes de flujo que mostrarían la trayectoria ininterrumpida del fluido.
5. El código final se encargaría de crear los contornos velocidad y los contornos de disipación turbulenta.

Esto permitió tener otra herramienta para comparar con los resultados a obtener a través de CFD.

Los códigos para hacer este procesamiento se encuentran en el CD que acompaña a este trabajo.

2. SIMULACION CFD A TRAVES DE ANSYS® FLUENT®

Para lograr esta parte de la investigación se utilizaron los módulos del software ANSYS® Workbench® 18.2 de acuerdo a una licencia académica disponible en la universidad. Para las simulaciones se utilizó el módulo **Fluid Flow (Fluent)** el cual está formado por los componentes principales para un análisis de fluidos como son, Geometría, Malla, Setup, Solución y Resultados. Como caso específico; la naturaleza del experimento Quenchttest involucra rotación de la propela, la cual es la que comienza todo el movimiento, y transferencia de calor de la probeta al agua con el consiguiente aumento de la temperatura del agua posterior al enfriamiento de la probeta. Esto obligó a aplicar los métodos de simulación llamados **sliding mesh method** y **conjugate heat transfer method**. Al aplicar estos métodos de cálculo a la vez, el sistema estaría empleando

recursos computacionales muy altos, lo que demoraría el cálculo por semanas y se saldría de los límites planificados para tiempo de simulación. Para solucionar esto el experimento se dividió en dos regiones las cuales fueron simuladas por separado para evitar tener que usar los 2 métodos simultáneamente, de esta forma el tiempo de cálculo se redujo a días. Como se decidió no realizar las simulaciones de transferencia de calor por problemas de ajuste y convergencia del modelo, solo se incorporó la malla deslizante pero aun así se dividió el experimento en dos regiones pues cada simulación requiere de una entrada y una salida de flujo para su correcto cálculo y como en el modelo es la propela la que mueve el fluido y no hay entradas ni salidas esto hubiera significado un problema para la simulación.

El esquema de proyecto fue establecido como tres simulaciones de la zona 1 (malla deslizante) y 3 con la probeta fría en la zona 2 (Figura 10) de acuerdo a las velocidades de agitación.



Figura 10. Esquema del proyecto

2.1 MODELO GEOMETRICO

Para el correspondiente modelo geométrico, se usó el modelador directo SpaceClaim®, el cual es un software no paramétrico. Aquí, la geometría completa se modeló utilizando las dimensiones del manual original de SmartQuench proporcionado por Swerea IVF® [7], que resulta ser el fabricante del experimento Quenchotest. Se utilizó como base la norma ASTM D 6482-06 para corroborar la geometría en la cual está basada principalmente el manual de usuario del Quenchotest.

Como se explicó anteriormente el modelo geométrico se dividió en dos partes, pero primeramente se modeló la geometría completa. La casilla de máxima dimensión tiene aproximadamente 125x60x200 (Figura 11), y en ella se pusieron los detalles como la pared que divide las dos partes del tanque, el orificio donde se sitúa la barra y el espacio que ocupa la propela con su dominio rotatorio. Todos estos elementos fueron creados a través de las herramientas del SpaceClaim® como operaciones booleanas de adición y sustracción de volúmenes, y el uso de planos de corte y extrusiones.

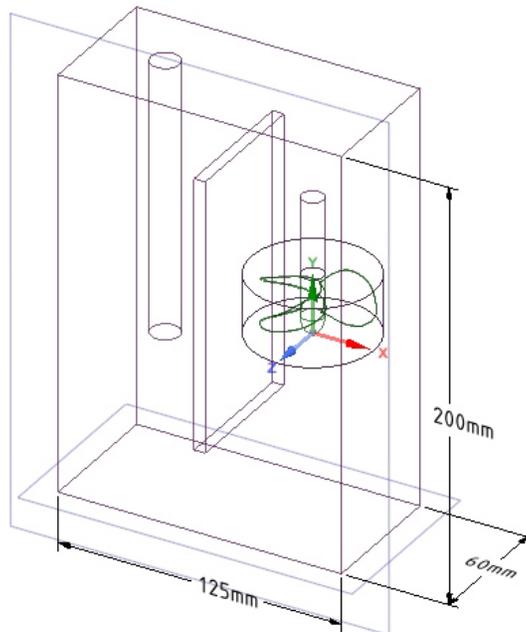


Figura 11. Casilla de máxima dimensión

La primera parte (Zona 1) (Figura 12) será la de la propela debido a que se usará el ***sliding mesh method*** para obtener todas las características del fluido movido por esta, pero este método será detallado en la sección del setup en Fluent®. Para la obtención del modelo geométrico de esta sección, se tiene especial atención en la modelación de la propela, la cual debido a sus complejas curvas representa un problema a la hora de ser generada en 3D en SpaceClaim®. La decisión que se tomó fue utilizar un escáner 3D láser KONICA MINOLTA Rango 7, el cual tiene una precisión milimétrica en la captura de dimensiones. Posteriormente la nube de puntos obtenida fue procesada a través del software que viene con el escáner para crear la forma final de la propela. Una vez que se digitalizó, se restó del volumen rotatorio que forma parte del dominio de fluido a ser simulado. A esta zona geométrica de la propela se le dió una altura de 100 mm lo cual era casi lo máximo que se le podía dar para obtener buenos resultados en la simulación de Fluent®.

La segunda zona que se modeló (Zona 2) (Figura 13) es la que incorpora la geometría de la probeta. En este dominio de fluido que tiene la transferencia de calor de la probeta al agua no hubo mucha complicación al crear el modelo geométrico pues no hubo grandes conceptos que se debían respetar para realizar una correcta simulación.

Al ser dos dominios de fluido simulados independientemente, se debe lograr la transferencia de los resultados de uno al otro, debido a que el dominio de la propela es el que inicia el movimiento (este es independiente del otro) y sus propiedades deben ser transferidas. Esto está explicado en la etapa del setup en Fluent.

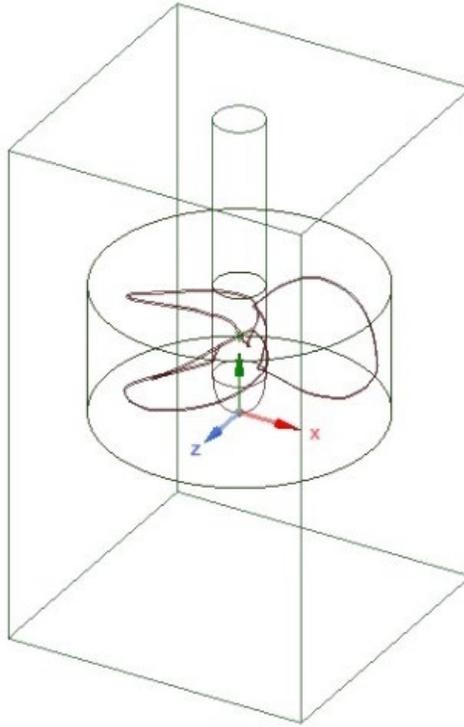


Figura 12. Zona 1 (zona de la propela)

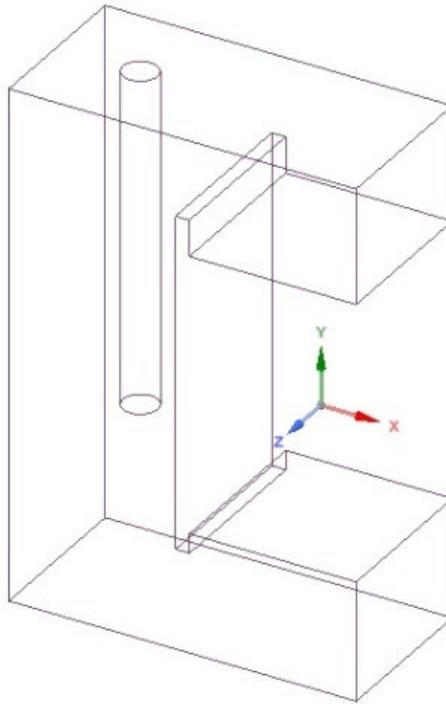


Figura 13. Zona 2 (zona de la probeta)

Algo que si se respetó es el origen de coordenadas del sistema, el cual es único y global para los dos experimentos, y fue definido en el punto de contacto más bajo con la propela, en su centro de rotación, pues fue una condición necesaria a la hora de definir la malla deslizante (Figura 12 y Figura 13).

2.2 MALLADO

Para realizar el mallado de la zona 1 (zona de la propela), se utilizó el Ansys Meshing®, que junto con el ICEM CFD® forman la solución de software para mallado orientado a fluidos del paquete Ansys Workbench®. Para esto fue necesario definir previamente el tipo de contacto entre las caras del volumen rotatorio y el dominio de fluido en el modelado geométrico de esta zona 1 como caras no compartidas (Figura 14). Esto significa que al definir las ***named selections*** en el mallado, se crearon las caras que se usaron para definir la interfase en Fluent®. Lo anteriormente mencionado forma parte de uno de los conceptos más importantes a la hora de utilizar el ***sliding mesh method***, puesto que si el tipo de contacto entre las caras hubiera sido definido como caras compartidas una vez que empezara la simulación esta causaría error debido a la aparición de volúmenes negativos, que es un error numérico que se produce cuando dos caras tienen un movimiento relativo alto y la difusión de la malla no se puede realizar correctamente si hablamos de forma numérica. Por eso una malla conforme no podría ser posible en esta interfase.

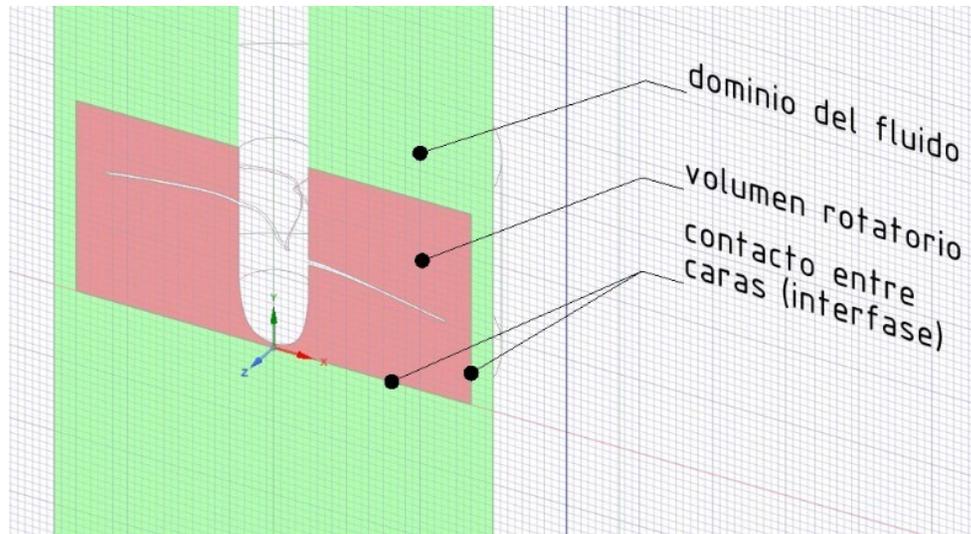


Figura 14. Identificación de zonas en el fluido (plano centrado en (0;0;0))

Posteriormente se editaron las preferencias de mallado para la zona 1. Se estableció el **solver** en modo Fluent®, el **size function** se ajustó en **proximity and curvature** y el **relevance center** en **fine**. En el apartado de calidad de la malla, el **smoothing** se fijó en **high**, y en **mesh metrics** se habilitó el **ortogonal quality** y luego **skewness**. A través de estas últimas se checó la calidad del mallado pues el software hace una comparación entre la celda real y la celda ideal por lo que es un indicador muy eficiente a la hora de ver las zonas con malla de baja calidad y de esa forma actuar inmediatamente.

El tipo de celda deseado en la malla se mantuvo en tetragonal pues debido a la geometría de la propela se hizo casi imposible una malla hexaédrica. Este tipo de celda tuvo repercusiones en el tiempo de creación de la malla y posteriormente en el tiempo de simulación ya que involucra un número mayor de elementos que si hubiera sido una malla hexaédrica, debido a que un tetraedro tiene 4 lados que comparte con los elementos vecinos y un hexaedro tiene seis.

La llamada **inflation layer** era necesaria para respetar la capa límite hidrodinámica y las funciones de la pared en la región cercana a la hélice y las paredes del tanque, pero por problemas de convergencia y de baja capacidad de cómputo se tuvo que desactivar esta característica en la simulación de la zona 1.

Seguidamente se crearon las **named selections**, o zonas nombradas que son los espacios geométricos que se definen para ser usados de forma predeterminada en Fluent, las **named selections** para la zona 1 son:

1. inlet top (entrada superior de flujo)
2. outlet bot (salida inferior de flujo)
3. interintop (cara del volumen rotatorio que formará la interfase)
4. interinside (ídem a 3)
5. interinbot (ídem a 3)
6. interouttop (cara del dominio del fluido que formará la interfase)
7. interoutside (ídem a 6)
8. interoutbot (ídem a 6)

Otros ajustes que se le realizaron a la malla de la zona 1 fueron los ajustes de tamaños de caras y de volúmenes. Por ejemplo, el volumen rotatorio fue fijado arbitrariamente a un tamaño de elemento de 0.9 mm, así como los tamaños de las caras de la interfase, las cuales se fijaron en 0.9 mm también (Figura 16). Estos ajustes y refinamientos tienen su importancia si queremos que la malla en el área cercana a la propela sea más fina y las caras con movimiento relativo tengan un tratamiento matemático preciso y una transferencia de momentum cercana al 100%. Todo esto fue necesario debido a que la propela es la que inicia el movimiento del fluido en el experimento.

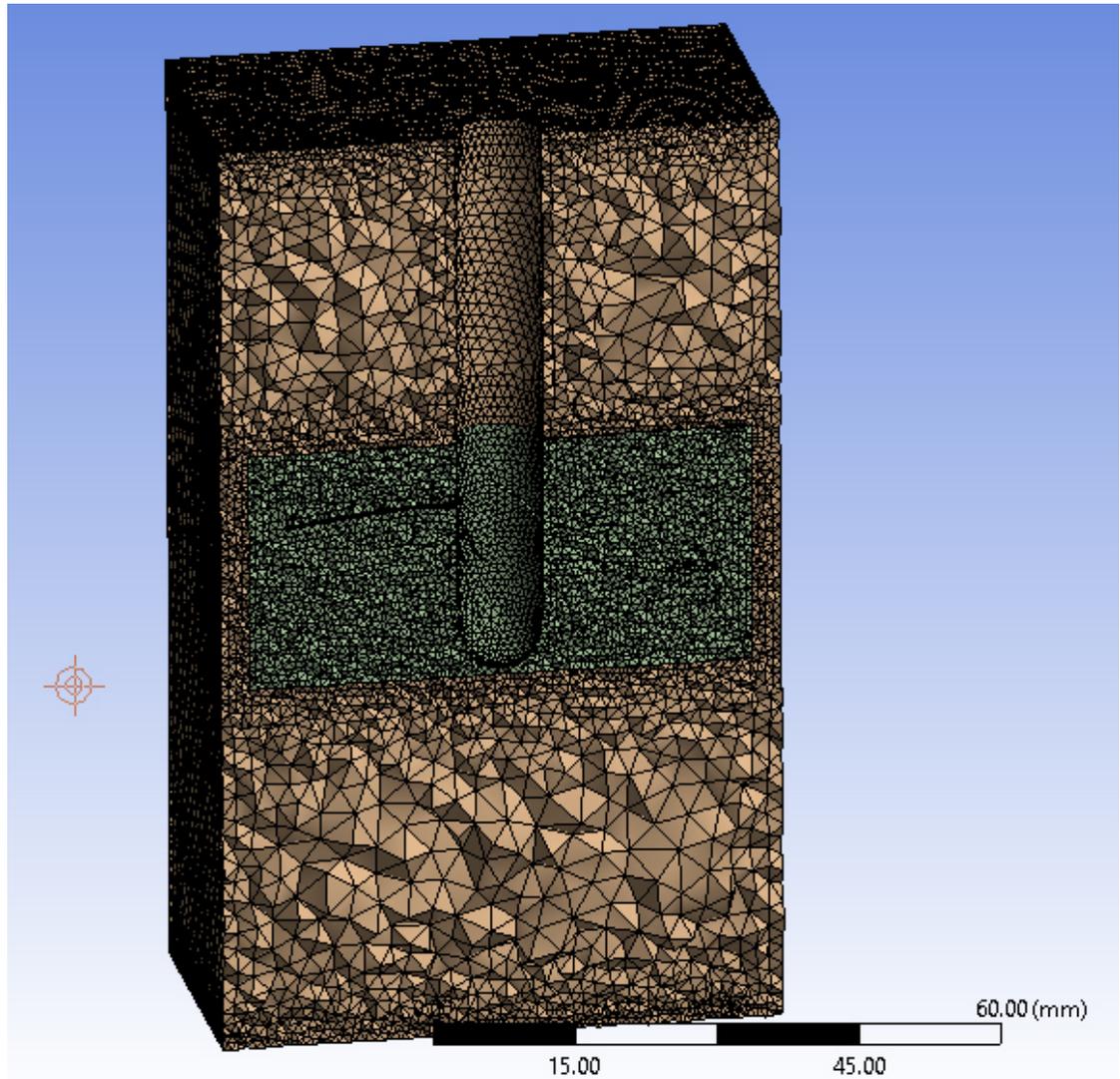


Figura 15. Mallado de zona 1 (sección)

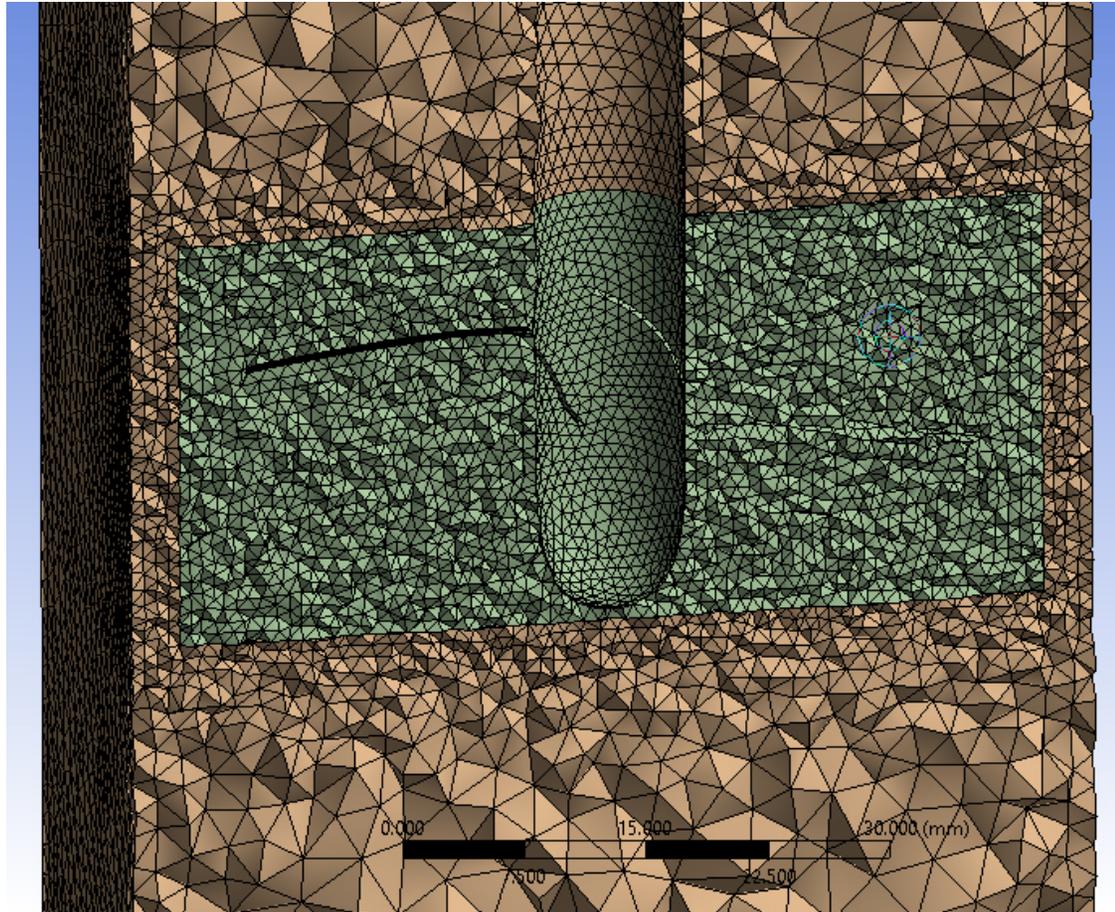


Figura 16. Acercamiento a la propela en el mallado de la zona 1 (sección)

Para el mallado de la zona 2 no fue necesario definir ninguna interfase de rotación puesto que no hay caras con ese comportamiento y por tanto no hay malla deslizante. Esto significa que en las **named selections** no fue necesario definir caras que tendrán un movimiento relativo. Sin embargo, para propósitos de una malla más correctamente estructurada si se definieron caras para una interfase estática la cual rodea la zona de la probeta (Figura 17).

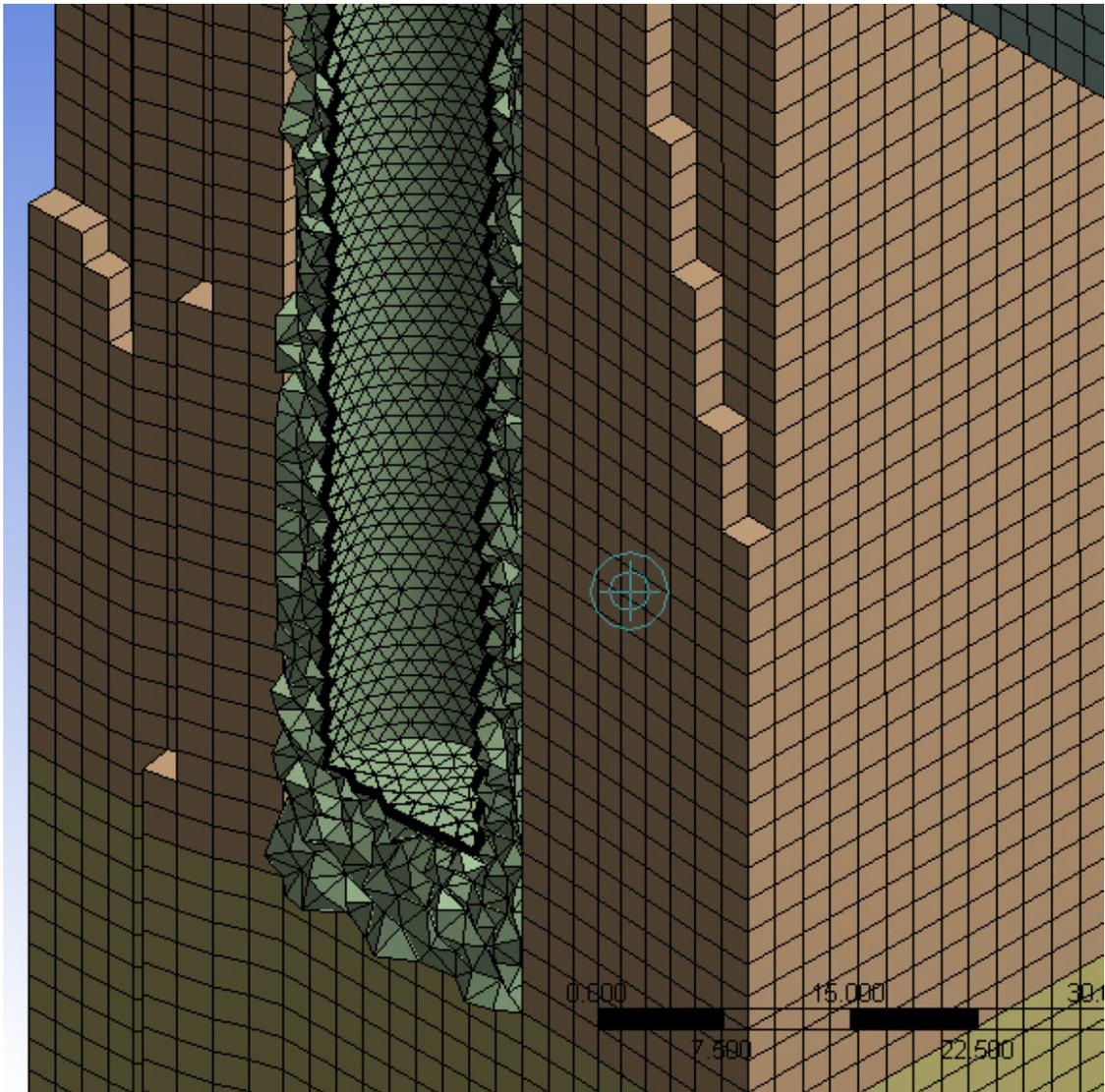


Figura 17. Interfase en zona cercana a la probeta (sección)

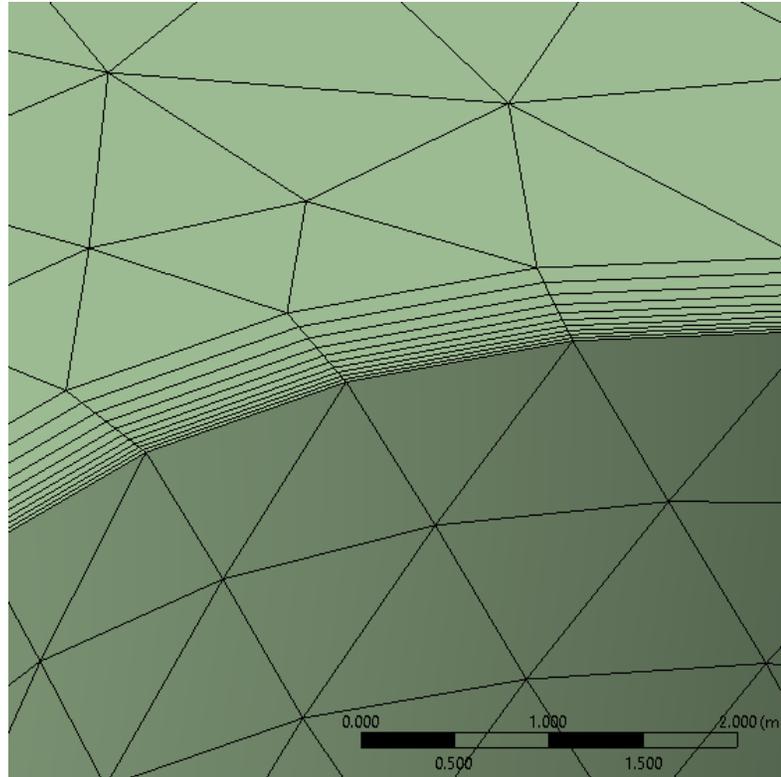


Figura 18. ***Inflation layers*** en la pared de la probeta

Esto se definió para poder dividir la malla en dos regiones. La primera región usa elementos hexaédricos y la segunda región que es la cercana a la probeta usa elementos tetraédricos. La razón por la que se dividió la malla en dos regiones fue debido a la necesidad de disminuir el tiempo de cálculo y aumentar la calidad final del mallado para de esa forma ayudar a la rápida convergencia de la simulación y porque el mallado de la zona cercana a la probeta no aceptó el elemento tipo hexaedro, de otra forma la malla hexaédrica hubiera dominado el experimento.

Para crear la malla hexaédrica se debió dividir la geometría en varias zonas para luego usar el método ***multizone*** que ofrece el Meshing®. Como la región más importante del experimento y de donde se van a sacar conclusiones es de la zona cercana a la probeta fue imperativo obtener la capa límite hidrodinámica a través de la herramienta ***inflation layer*** la cual permite escoger la cantidad de capas, la razón de transición y la razón de crecimiento. En la pared de la probeta se puede observar que la malla es del tipo no estructurada (Figura 18).

Las preferencias de mallado para la zona 2 fueron las mismas que para la zona 1. Se estableció el **solver** en modo Fluent®, el **size function** se ajustó en **proximity and curvature** y el **relevance center** en **fine**. En el apartado de calidad de la malla, el **smoothing** se fijó en **high**, y en **mesh metrics** se habilitó el **ortogonal quality** y luego **skewness**.

Las **named selections** para la zona 2 son:

1. inlet (entrada de flujo)
2. outlet (salida de flujo)
3. wall fluid domain (dominio del fluido)
4. barra (pared de la probeta para ser usada en el postprocesamiento)
5. interin (cara del dominio del fluido que formará la interfase)
6. interout (cara del dominio del fluido que formará la interfase)

Resumiendo, se puede decir que se necesitaron varios métodos, refinamientos y dimensionamientos para obtener una malla no conforme en las interfases, no estructurada y aceptable basada en la asimetría y la calidad ortogonal (propiedad de métricas de malla).

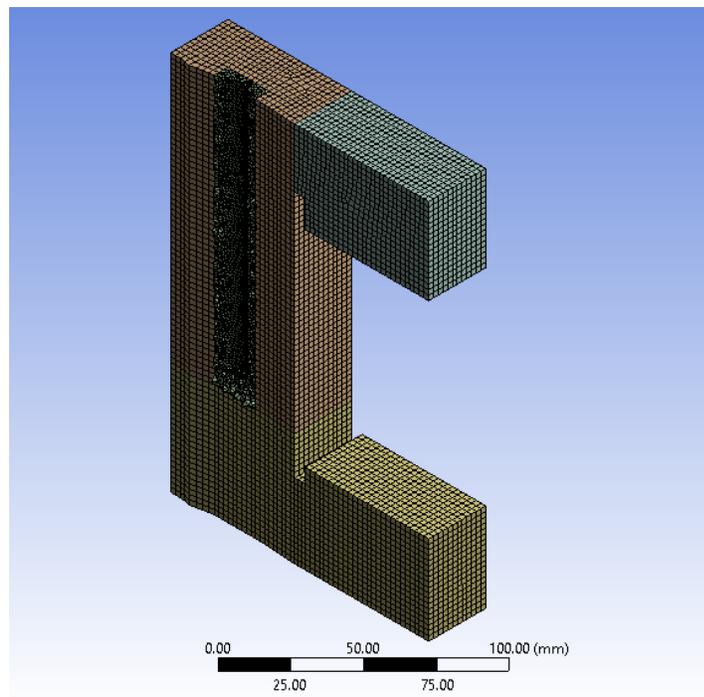


Figura 19. Mallado de la zona 2 (sección)

2.3 SETUP EN ANSYS FLUENT

Para llevar a cabo el setup en Fluent®, fue necesario tener un conocimiento previo tanto de computación como del software en sí. Los pasos que se siguieron para la simulación de la zona 1, serán detallados a continuación.

Primeramente, abrimos el Fluent® y marcamos la casilla de **double precision** para evitar errores de redondeo y luego marcamos **parallel** para permitir que el software usara múltiples núcleos y ahí marcamos 3 de los cuatro núcleos de cálculo disponibles en la computadora.

Lo primero que saltó al análisis es que es una simulación 3d y eso Fluent lo detectó automáticamente a través de la geometría. Seguidamente fue necesario verificar en las herramientas de importación y ajuste si la malla fue correctamente generada y traducida al Fluent sin errores. Esto quiere decir que la malla se revisó a través del botón **Check** que está dentro del grupo de herramientas **Mesh** junto con **Report Quality** para ver si hubo error, o nodos no conectados o algo similar. Esta última herramienta (**Report Quality**) permite revisar visualmente la calidad de la malla importada y si hay algún volumen negativo o algo parecido.

El próximo paso fue escoger que tipo de tratamiento se le iba a dar a las ecuaciones del modelo de simulación, basado en la presión o basado en la densidad. El primero de ellos fue el que se usó para la presente investigación y abarca de forma general casi todos los fenómenos de la naturaleza y es un acercamiento usado para tratar modelos incompresibles y de relativa baja velocidad, mientras que el segundo es usado para modelos compresibles y de alta velocidad como los fluidos supersónicos.

Lo siguiente y muy importante fue definir si se necesitaba hacer una simulación en el tiempo del modelo o si solamente se necesitaba tener el estado final del fluido provocado por la probeta. En este caso como la propela estaba en movimiento relativo con respecto al dominio del fluido, el modo transiente fue activado para obtener un registro en el tiempo de las consecuencias de la propela en el flujo.

Se activó la gravedad como -9.8 m/s^2 en el eje Y para aplicarle al agua sus propiedades inerciales y las unidades de velocidad angular se configuraron a *rpm* debido a que los experimentos se establecieron en valores de *rpm*. Con esto quedó configurado el software en el apartado **General**.

Seguidamente se configuraron los modelos físicos que rigen las leyes del comportamiento del fluido. En este caso solo la viscosidad fue establecida en el modelo **k- ϵ Realizable**, el cual es el más usado en fenómenos de fluidos generales ya que incorpora 2 ecuaciones que caracteriza los fenómenos de difusión y convección de la energía en fluidos turbulentos y el término **Realizable** lo que hace es introducir mejoras al modelo estándar. Las propiedades de la pared se activaron como **Scalable Wall Functions** debido a que como no se pudo crear la **inflation layer** en la pared de la propela, los efectos de la capa límite no fueron capturados y esto permite que no haya errores de convergencia en los modelos simulados.

Para definir el material se buscó el agua en la base de datos de Fluent® y se copió a los materiales disponibles como Fluido además del aire.

En el apartado de **Cell Zone Conditions** los dos componentes de fluido (el volumen rotatorio y el dominio del fluido) aparecieron como elementos aislados editables. Al momento de la edición del volumen rotatorio se puso en práctica el concepto de **sliding mesh** pues esta parte del fluido fue la que debió rotar durante toda la simulación. Este método consistió en asignarle propiedades rotacionales a un punto del sistema de coordenadas de la malla, para la cual fueron definidas interfases previas en los lugares donde las partes tendrán un movimiento relativo entre ellas. Para esto se le asignó el material agua y se seleccionó **mesh motion** para que las demás opciones estuvieran disponibles. Aquí se estableció la velocidad rotacional de la propela por ejemplo a 1000 rpm, se definió el eje de rotación como Y y el movimiento se establece como absoluto en el punto (0;0;0) el cual se refiere a la punta de la propela (Figura 12) . Al dominio del fluido no se le editó nada más que el material el cual es establecido como agua.

En las **Boundary Conditions** (condiciones de contorno) se editó el comportamiento que tendrían las paredes, las entradas, las salidas y las interfases presentes en el modelo. Para editar la **inlet_top** (entrada superior), se tuvo en cuenta que, si bien esta entrada no iba a ser la fuente inicial del movimiento, de cualquier forma, se le debía asignar una velocidad mínima para no tener modelos matemáticos indefinidos ni nada por el estilo. Para ello se definió como **pressure-inlet** y se le asignó 0.1 Pa de presión, y el método específico de turbulencia se validó asignando un valor de intensidad de turbulencia (el cual se deja por defecto) y un diámetro hidráulico de 0.06 m. Como la simulación es isotérmica la pestaña de datos dependientes de la temperatura no se encontraba activada.

Para editar la salida de flujo de la zona 1, nombrada como **outlet_bot**, se estableció como tipo **pressure-outlet**. En esta la idea principal es tratar de establecer un acercamiento lo más preciso posible al comportamiento real del flujo en la salida, y en este caso entrando como **backflow**, o lo que es lo mismo se trató de definir cómo será el flujo que ingresa por la salida en el caso de que haya recirculación, si se hubiera sido capaz de poner un manómetro en esta salida, se hubiera podido entrar el valor de presión manométrica para así poder simular más correctamente el flujo de fluidos en esta zona. La intensidad de la turbulencia en esta salida y el diámetro hidráulico se especificaron de la misma manera que en la entrada, pero en esta era del tipo **backflow** (aplicables al fluido en retroceso).

La otra parte importante a definir en estas condiciones de contorno, fueron las interfases. Hasta el momento estas se encontraban como paredes (**wall**), pero al ser cambiadas a **interface** aparecieron disponibles en el apartado **Mesh Interfaces**, el cual se explicará a continuación.

En el apartado **Mesh Interfaces** fue donde se editó manualmente la interacción de las caras definidas para este propósito. Aquí se hizo coincidir en una parte de la ventana las caras 3, 4, y 5, con la 6, 7 y 8 de forma manual, luego de darle un nombre a la interfase para su identificación. Si se hubiera querido definir una interacción del tipo FSI (**Fluid-Solid Interaction**), es decir una interacción entre

un sólido y un fluido como el caso específico de transferencia de calor de la barra al agua, se hubiera marcado la casilla **Coupled Wall** lo que la convertiría en pared acoplada con su respectivo tratamiento matemático. Con esto quedó definido todo lo concerniente al dominio del fluido en la zona 1 y las leyes físicas imperantes.

Para definir los métodos numéricos que ayudaron a solucionar el modelo matemático establecido anteriormente, procedimos a definir el esquema como PISO el cual es muy parecido al SIMPLE, que determina todas las ecuaciones a la misma vez de forma unida, pero se hizo más provechoso debido a que mejoró la convergencia de modelos transientes a través de un acoplamiento mejor logrado entre la presión y la velocidad. Los valores de correcciones se dejaron por defecto. Con respecto a la discretización espacial, el gradiente se dejó en **least squares cell based**, la presión en **PRESTO!**, la ecuación de momentum se dejó en segundo orden en contra del viento por defecto y la energía cinética turbulenta y la razón de disipación turbulenta se dejaron en primer orden en contra del viento por defecto. Todo lo demás fue dejado por defecto.

Lo siguiente fue definir los monitores los cuales son las variables que se definen para saber cuándo alcanzan un valor estable en magnitud en una parte del modelo, lo que serviría para decir que en esa región, zona, línea, área, punto, volumen ya se estabilizaron las variables asignadas y sería un indicador clave para saber que el modelo está realizando los cálculos correctos y que posiblemente no hubiera sido necesario continuar la simulación (en el caso de que fuera transiente). Como monitores se definieron la presión y la velocidad en la salida de flujo, sin la temperatura, ya que el modelo es isotérmico. Lo demás se quedó por defecto.

Otro de los pasos importantes es la forma de inicializar el cálculo. Hay varias formas de calcular cual es el valor inicial de las variables en el momento $t=0$. Con el **Hybrid Initialization** se podría lograr hacer una inicialización algo precisa, pero implicaría darle en la mayoría de los casos valores a las variables un poco alejados de la realidad. En esta zona se decidió realizar una inicialización estándar para asignar el cero a casi todos los valores de las variables.

En las actividades de cálculo se estableció un autosave que permitió guardar resultados de variables cada 15 pasos (**time steps**). En este apartado el Fluent® ofrece la posibilidad de realizar animaciones por cantidad de **time steps** definidos. Aquí se fijó que se estuviera mostrando la animación de la presión, la velocidad, y los vectores de velocidad en un plano transversal que secciona verticalmente el modelo y esto se guardó en la memoria del sistema cada 5 **time steps** y se iba actualizando.

Finalmente, en el apartado de cálculo, se verifica el caso creado para ver si hay inconsistencias en el modelo que pudieran causar errores de convergencia o recomendaciones de otras configuraciones equivalentes. Se definió el **time step size** como 5×10^{-3} s, el cual es un valor bien pequeño para no causar errores de convergencia y que el cálculo tuviera más precisión a la hora de capturar los fenómenos físicos. Se fijó como longitud de la medición en el tiempo a 1000 pasos, lo que implicaría un tiempo de cálculo de 5 segundos con 50 iteraciones por paso. Luego se definieron las cantidades a guardar para después ser procesadas. En este caso se guardó; la presión estática, la presión absoluta, la presión total, la magnitud de la velocidad y sus componentes, la energía cinética turbulenta, la razón de disipación turbulenta y el y^+ que es el valor que caracteriza el tratamiento de pared asociado a un espesor de capa límite determinado.

Luego se comenzó el cálculo y las variables empezaron a tomar valores, los monitores buscan la estabilidad, las animaciones comienzan a mostrar los resultados visuales y los residuos comienzan a converger hasta alcanzar un valor menor de 10^{-3} s. Este criterio de convergencia es el que sale por defecto en el programa y se mantiene así pues cambiarlo no produciría muchos arreglos a los resultados.

Una vez que alcanzaron la convergencia los resultados y se terminó el tiempo de cálculo se exportaron los perfiles. La exportación de perfiles es una herramienta muy útil pues permite exportar las variables que se deseen de un contorno de una región para ser utilizada en otra región que se encuentre compartiendo este contorno en su dominio, esto nos permitió que la salida de la zona 1 fuera la entrada de la zona 2 a través de cargar el perfil exportado en la simulación de la

zona 1. En este perfil definido como **prof 1000 sm.prof** para el caso de la simulación a 1000 rpm se exportaron la magnitud de la velocidad, las componentes de la velocidad, la energía cinética turbulenta y la razón de disipación turbulenta. Los perfiles de las otras simulaciones llevaron similar nombre, solo cambiándoles el valor de rpm.

Luego se guardó el caso para futuro postprocesamiento y con esto culminó la simulación del flujo de fluidos en la zona 1.

Con respecto a la zona 2, la cual como se explicó anteriormente es continuación de la zona 1 y utiliza el flujo procedente de esta, su diseño de simulación es casi idéntico.

Al abrir el programa se marcaron las mismas casillas que en la zona 1 y se checa la calidad y errores de la malla igual. El modelo fue basado en la presión debido a que es el mismo flujo incompresible.

Como en esta zona no había partes móviles que obligaran a tomar decisiones sobre si el modelo iba a ser dependiente del tiempo, se estableció como **Steady** o estable ya que solo importaba el estado final de la simulación.

El modelo que se activó fue el **k-epsilon Realizable** pero esta vez el tratamiento de pared fue **Enhanced Wall Fn** debido a que en el mallado se aplicó **inflation layer** para poder capturar la capa límite hidrodinámica en la cercanía de la probeta, lo que permitió ser más precisos a la hora de utilizar el **y+** y de esa forma el fluido en la pared de la barra estaba bien simulado.

Seguidamente se definió el material de la misma forma y se le aplicó el agua a la única región que salió activa en las **Cell Zone Conditions**. Hay que destacar que en este apartado no se activaron propiedades de rotación pues esta zona no tenía tales elementos rotatorios.

Para editar las **Boundary Conditions** se hizo necesario primero importar a esta zona, el perfil exportado en la zona 1, para que las variables contenidas en él sirvieran de parámetros en la entrada de flujo. Para editar el **inlet** de esta zona luego de haber importado el perfil, se estableció como **velocity inlet**. El método de especificación se puso en componentes para así poder elegir cada una de las componentes del perfil importado e incorporarlas a la simulación. En este paso

se incorporaron además de las componentes, los valores de Energía Cinética Turbulenta y Razón de Disipación Turbulenta. La salida de flujo (**outlet**) se estableció de la misma forma que en la zona 1. Las demás caras activas (5 y 6) son las que formaron parte de la interfase que se creó con el objetivo de dividir las zonas de mallado. Esta interfase se creó de la misma forma.

En los métodos de solución el esquema fue el que cambió solamente pues para estos fines con SIMPLE se garantizó la resolución de todas las ecuaciones correctamente. Los demás ajustes se dejaron por defecto.

Se definieron los mismos monitores de presión y velocidad para verificar si estas variables se estabilizaban a la salida del flujo.

La inicialización fue del tipo híbrida pues se contó con datos iniciales de velocidad y turbulencia provenientes del perfil importado y si se establecía en estándar estos valores iban a ser convertidos a cero.

Se fijó el **autosave** a 15 pasos y las animaciones de presión, velocidad y vectores de velocidad a ser mostradas en pantalla cada 5 pasos de tiempo.

En la sección de corrida del cálculo se verificaron los posibles errores de configuración y se establecieron 1000 iteraciones. Se escogieron las variables a ser guardadas.

Una vez que se puso a calcular el modelo convergió en aproximadamente 600 iteraciones bajo el criterio de 10^{-3} s y los monitores se estabilizaron. Luego se guardó el caso para futuro postprocesamiento y con esto culminó la simulación del flujo de fluidos en la zona 2.

Los pasos realizados anteriormente para llevar a cabo las simulaciones de las dos zonas fueron repetidos para completar el esquema del proyecto (Figura 10), pero esta vez con las restantes velocidades de agitación.

2.4 POSTPROCESAMIENTO EN CFD-POST

Una vez terminadas las simulaciones en Fluent, lo que restó fue darle el postprocesamiento que requerían los resultados, porque, aunque el propio programa tenía su apartado de visualización de resultados, no está tan orientado

al postprocesamiento como CFD-Post. Este es un software que permite establecer ciertas zonas (planos, puntos, líneas, planos de corte) para ser analizadas a través de contornos, vectores, líneas de corriente, representaciones de volúmenes que dan una idea muy precisa del estado de las variables seleccionadas.

En el postprocesamiento de la zona 1, una vez abierto el programa desde el icono **resultados** de las etapas de simulación de la zona 1 (Figura 21), lo primero que se hizo fue definir los planos de interés, estos planos deben coincidir con los establecidos en la etapa de PIV. Para definir estos planos se hizo clic en **Insert**, luego **Location** y en **Plane**, luego en la ventana de detalles que se abrió se escogió el método como XY y al valor de Z se le asignó el valor de 0, los demás apartados fueron dejados por defecto, esta descripción correspondió con la creación del plano llamado IZQ DER CENT (Figura 20). Este plano es el que corresponde a los experimentos donde el láser corta por la mitad el Quenchttest y por consiguiente la barra y la propela, y este permitió sacar información de los dos casos, donde el láser corta la barra desde la izquierda, y donde el láser corta la propela por la derecha.

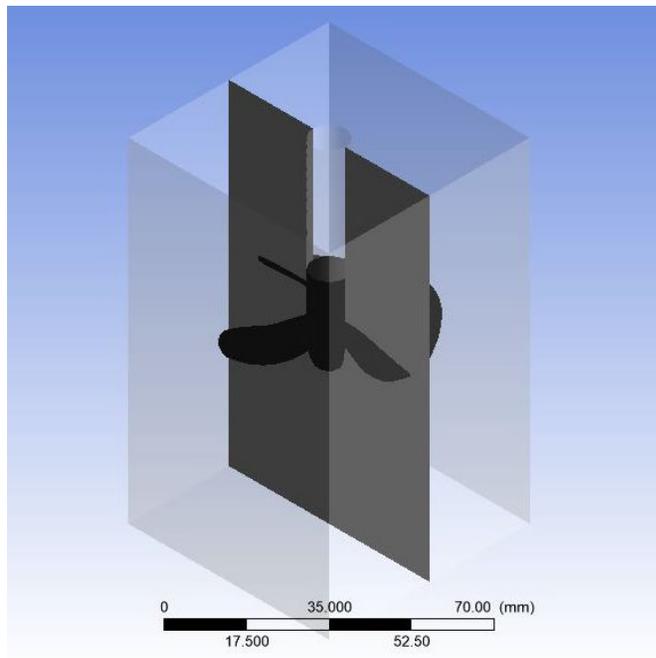


Figura 20. Plano IZQ DER CENT

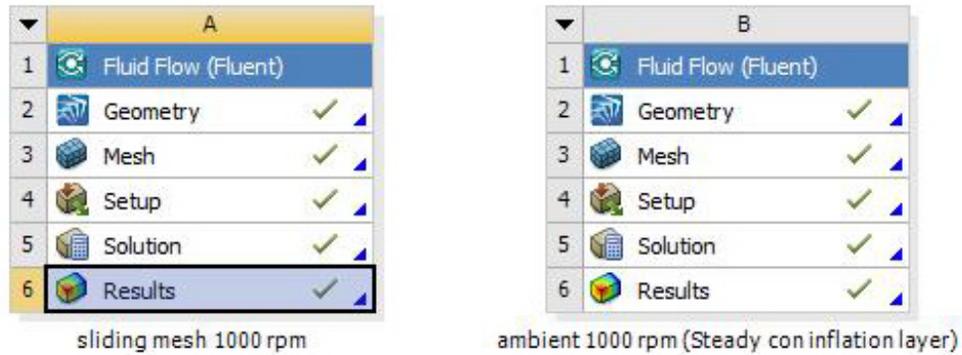


Figura 21. Iconos de las etapas de la simulación.

Como siempre se puede mejorar la visualización de los modelos en este tipo de programas; se seleccionó el dominio del fluido, se ajustó la transparencia a 0.8 y se escogió el color blanco para tener una vista más real. Lo mismo se hizo con la cara correspondiente a la propela del volumen rotatorio, cuya transparencia se fijó en 0 debido a que se escogió el color negro para esta.

De esta misma forma fueron creados los planos DER 10 MM e IZQ 10 MM, solamente que a los valores de Z esta vez se le asignaron -10 y 10 respectivamente para tener los planos que iban a servir para obtener la información del fluido en los cortes verticales. Los siguientes planos por crear fueron PROP 1MM BAJO, BARRA 10 MM SOBRE, BARRA 10 BAJO Y MEDIO 10 MM SOBRE, pero esta vez en el plano XZ con valores de la coordenada Y de -1, -8.4, -28.4 y -37 mm del cero de coordenadas respectivamente.

Una situación particular sucedió en la creación de estos planos pues como se explicó anteriormente, cuando el láser se hace incidir desde el lateral izquierdo centrado este incide directamente con la barra y esta proyecta una sombra la cual no deja ver nada de lo que está detrás. Por esa razón sería un error obtener un contorno de velocidad de un plano de corte de toda la zona 1 como lo representa la Figura 20. En vez de lo anterior, se utilizó la herramienta **Iso Clip** la cual está en **Insert** y luego **Location**. Esta herramienta fue capaz de producir un plano de corte acotado por determinada propiedad; ya sea un valor de X, Y o Z, o un valor de presión, temperatura, velocidad o densidad. En este caso solamente se necesitó una parte del plano. Para esto se definieron 2 **Iso Clips**, el primero,

nombrado DER CENT 1, se encargó de definir la región para la cual $Y \leq 0.5$. El segundo, nombrado DER CENT 2, definió la región para la cual $X \geq 0.5$. De esta forma garantizamos que el postprocesamiento se pareciera lo más posible a la realidad (Figura 22).

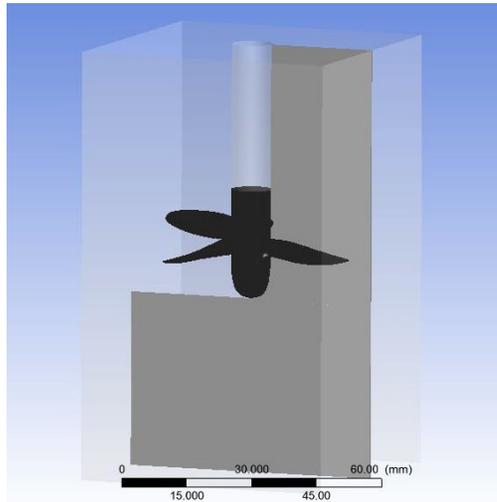


Figura 22. Plano DER CENT luego de aplicar *Iso Clips*

Como la zona 1 solo representa una parte del Quenchotest y está acotada por encima de la división central que divide el experimento en dos (Figura 12), hay un plano que no se encuentra, este es el MEDIO 10 MM BAJO. Por este motivo, cuando se vayan a exportar los contornos y vectores de velocidad de esta zona deben ser presentados en conjunto con los de la zona 2 pues juntos formarán el contorno real y completo del experimento.

Una vez creados los planos y aclarado lo que implica tener el experimento dividido en dos, se explicará cómo se procedió a crear los contornos y vectores de velocidad en la zona 1.

Para crear los contornos de velocidad se accedió a **Contour** desde el menú **Insert**. Instantáneamente se abrió una ventana la cual pedía identificar el contorno, el cual fue nombrado como DER CENT. Lo importante de esta definición de plano centrado es la locación, en la lista de locaciones fueron escogidos los dos **Iso Clips** definidos para este propósito y el resultado fue un

contorno definido solamente en el lugar donde es registrado comportamiento del fluido de acuerdo con la incidencia del láser desde la derecha.

También se crearon los contornos correspondientes a los planos DER 10 MM e IZQ 10 MM. El contorno de velocidad correspondiente al plano IZQ CENT no tuvo sentido que fuera creado pues cuando el láser se hace incidir sobre el experimento de forma vertical centrada, este incide sobre la barra y proyecta una sombra la cual deja sin información del flujo de fluidos a la zona 1 en este plano. Seguidamente se crearon los contornos correspondientes a los planos PROP 1MM BAJO, BARRA 10 MM SOBRE, BARRA 10 BAJO y MEDIO 10 MM SOBRE de la misma forma.

Algo de mucha utilidad para el mejor entendimiento del flujo, fue la adición de la herramienta vectores al postprocesamiento de la zona 1. Estos se crearon desde **Insert** y luego **Vector** y están asociados a los mismos planos que se usaron para definir los contornos de velocidad, con la particularidad de los planos DER CENT e IZQ CENT, los cuales fueron sustituidos por los **Iso Clips** que forman el corte real donde hay información del flujo de fluidos. Con estos vectores se conoció el verdadero movimiento y dirección del agua en el Quenchttest, así como de las zonas de recirculación y del efecto que provocan los cambios de secciones.

Para conocer más a fondo el movimiento del fluido en el volumen rotatorio, se realizó un análisis de vectores donde la locación fue precisamente el volumen rotatorio. Debido a la alta concentración de vectores en esta región, fue preciso hacer modificaciones. Se aplicó un factor de reducción de 50 para disminuir la cantidad de vectores, el tipo de símbolo fue Arrow3D y el tamaño fue de 1.

Para llevar a cabo el postprocesamiento de la zona 2 se procedió de la misma forma. Se ajustó la transparencia del volumen del fluido a 0.7 y se escogió el color blanco. También se coloreó la barra de negro con transparencia de 0 para más nitidez.

Se crearon los planos de acuerdo con los cortes establecidos en la etapa de PIV, estos planos fueron exactamente igual a los definidos en la zona 1 pues el sistema de coordenadas es global. Lo único diferente aquí fue que el plano

MEDIO 10 MM BAJO si se tuvo que definir pues en esta parte del experimento si se pueden ver todos los planos de análisis ya que está acotada por la casilla de máxima dimensión (Figura 11). Este último está sobre el plano XZ y la coordenada Y es -57.

La creación de contornos también se realizó de la misma forma que en la zona 1 siguiendo cada paso, accediendo a **Contour** desde el menú **Insert** y asignando cada plano correspondiente. En esta zona 2, sucedió algo parecido, y es que también existió la necesidad de crear planos de corte (**Iso Clips**) para la creación de los planos centrados, debido a la interferencia de la propela y la barra al incidir el láser desde ambos lados como se explicó anteriormente. Los **Iso Clips** creados fueron nombrados ordenadamente y tuvieron las siguientes restricciones:

1. DER CENT 3 para:
Y<=-18.412 mm
2. DER CENT 4 para:
Y<=10.412 mm
X>=-65 mm
3. IZQ CENT 1 para:
Y<=-18.412 mm
4. IZQ CENT 2 para:
X<=-65 mm

Con esto quedaron definidos los planos. Los contornos fueron creados de la misma forma y fueron nombrados igual que cada plano asignado.

También fueron creados los vectores para el mejor entendimiento de las trayectorias del fluido.

Debido a que esta zona es la más importante pensando en que aquí es donde se encuentra la barra, surgió la necesidad de conocer el comportamiento, velocidad, turbulencia y demás propiedades del fluido, primeramente, en la región cercana al termopar y en los cambios bruscos de sección como en la parte baja de la barra, en la zona media de la barra y en la salida superior que lleva a la zona 1.

Por este motivo se definieron puntos de análisis (Figura 23) en la zona del termopar (30 mm por encima del fondo de la barra), cuyas coordenadas fueron según la Tabla 2:

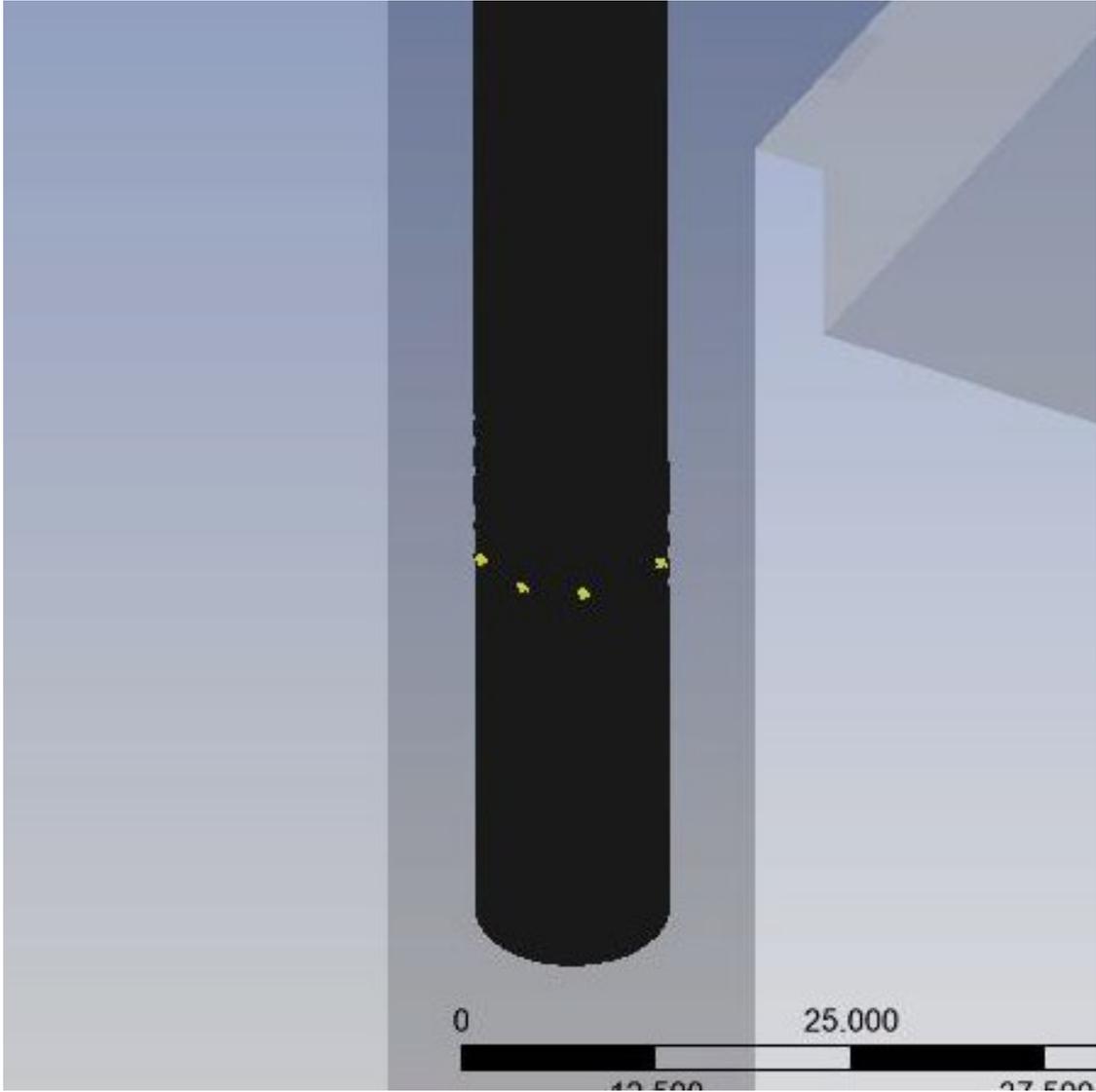


Figura 23. Puntos de análisis

Tabla 2. Coordenadas de los puntos

	x	y	z
1	-65	11.588	6.5
2	-65	11.588	-6.5
3	-58.5	11.588	0
4	-71.5	11.588	0
5	-61.25	11.588	5.25
6	-68.75	11.588	5.25
7	-61.25	11.588	-5.25
8	-68.75	11.588	-5.25

Seguidamente a esto y lejos de hacer un análisis puntual del comportamiento del fluido en la zona cercana al termopar, se definieron líneas con el objetivo de conocer la tendencia de cada una de las componentes de velocidad cerca de la barra como muestra la Figura 24 y sus coordenadas según la Tabla 3:

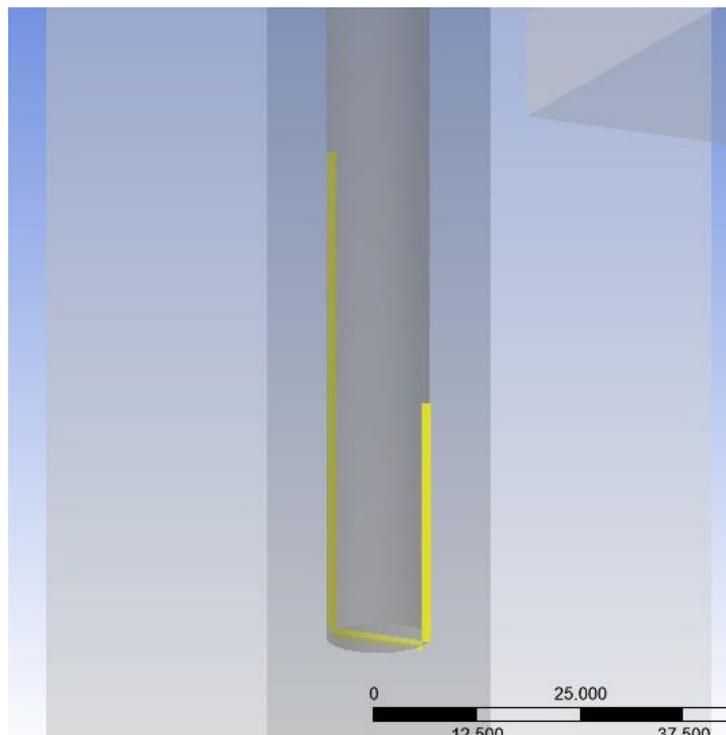


Figura 24. Líneas de análisis

Tabla 3. Coordenadas de las líneas de análisis

	x	y	z
bot bar	-71	-18.5	0
horizontal	-59	-18.5	0
der bar	-58.5	-18	0
vertical	-58.5	12	0
izq bar vert	-71.4	-18	0
	-71.4	42	0

Con esto queda definido lo concerniente al postprocesamiento de las simulaciones de fluidos efectuadas en Fluent.

3. EXPERIMENTOS QUENCHOTEST

Estos experimentos se realizaron de acuerdo a las recomendaciones de Swerea IVF® en el manual de uso IVF Smart Quench [7]. Se realizaron 9 mediciones en total divididas en tres corridas experimentales para las 3 velocidades de agitación como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Números de probeta

Velocidad de agitación	No. de probeta (1era corrida)	No. de probeta (2da corrida)	No. de probeta (3era corrida)
200	1003	1006	1009
600	1002	1005	1008
1000	1001	1004	1007

3.1 PROCEDIMIENTO DE MEDICION

Una vez que todos los componentes y equipos anteriormente descritos están conectados y preparados se procedió a calentar el horno. En esta operación,

después de accionar el botón de encendido, el horno comienza a calentarse automáticamente hasta que se estabiliza a una temperatura de 870°C, un indicador de luz mostró el estado de encendido y le tomó alrededor de 15 min estabilizarse a esa temperatura debido a su curva de calentamiento.

Antes de introducir la probeta en el horno fue necesario prepararla limpiando su superficie con papel de lijar grado 180 para desbaste alto y 320 para el pulido de la superficie de trabajo. Con esto se eliminaron los restos del medio de temple usado y de óxido en caso de haber sido usada anteriormente. Si es una probeta nueva se deberán realizar al menos 6 pruebas piloto para acondicionarla.

En este caso se utilizó como medio de temple agua corriente, pero el tanque de acrílico debió ser limpiado antes de ser usado para evitar que hubiera partículas que interfirieran con la medición, así como para la eliminación de burbujas de la superficie de la pared para que no fueran arrastradas y no chocaran con la probeta de Inconel.

Fue importante que la unidad de mano estuviera preparada para la medición, para esto se revisó la carga de las baterías. La conectamos a la probeta a través del cable que viene en la maleta de herramientas del Smart Quench y luego entramos en su configuración [7]

Para realizar la configuración de la unidad de mano, se escogió el modo de recolección de datos **automático**, el cual permitió que la medición comenzara automáticamente luego de detectar una caída de temperatura en la probeta por debajo del setpoint. La medición duró un total de 60 segundos con una frecuencia de 1 Hz, y como setpoint se estableció 850°C. Para esto la probeta debió haberse calentado en el horno por 7 minutos aproximadamente hasta que estuvo 5°C por encima de 850°C [7].

Una vez que se da **start** en la unidad de mano, el equipo está preparado para realizar la medición al detectar que la temperatura disminuye por debajo de 850°C, por eso el cambio de probeta del horno al tanque de temple se debió hacer muy rápido para que esta entrara al temple con una temperatura encima de 850°C y su curva pueda ser guardada satisfactoriamente.

Luego de terminada la medición se guardó el resultado escribiendo un nombre para la curva y su posterior postprocesamiento. Después de esto se retiró el cable de la probeta y de la unidad de mano y se hizo la transmisión de los datos a la computadora.

Antes de continuar, es necesario mencionar que la primera medida antes de realizar cualquier experimento en el laboratorio es revisar las normas de seguridad recomendadas para estos usos según los videos disponibles en la plataforma de Swerea IVF®.

3.2 PROCESAMIENTO DE DATOS OBTENIDOS (PRIMERA FASE)

Para hacer la transmisión de los datos de la unidad de mano a la computadora fue necesario conectar el adaptador bluetooth que viene en la maleta del equipo y verificar que el controlador estuviera instalado, el mismo vino en el CD-ROM de instalación del software Smart Quench®. Una vez revisado esto se emparejó la unidad de mano con la computadora y comenzó la transmisión de datos.

Para lograr esto se seleccionó **unidad manual** en el software y se abrió la ventana de gestión de curvas Figura 25.

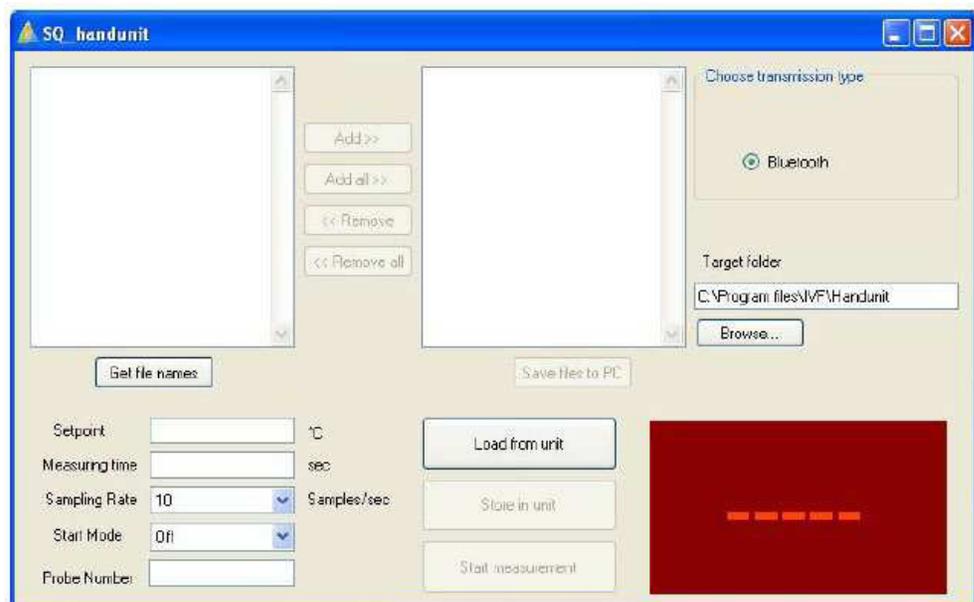


Figura 25. Ventana de transmisión de datos

Luego dimos en obtener curvas y las almacenamos en la computadora. Una vez que la llave digital (memoria flash) del programa fue introducida en la PC se realizó la importación de las curvas en DATABASE-CURVE-CURVE DATA, luego se creó un nuevo directorio en el sistema y abrimos las curvas para que quedaran registradas en ese sitio, esto lo repetimos con las demás hasta que fue suficiente. El software también nos permitió exportar estos datos para ser procesados en otro programa bajo la extensión ***.dat**. Como la unidad manual solo permitía editar datos básicos de información de la probeta y del experimento, el programa permite hacer una edición más avanzada y completa permitiendo escribir datos específicos de la concentración del polímero usado, la densidad, la agitación etc.

Para la evaluación de las curvas escogimos EVALUATION-MONITORING y al abrirse una ventana se dió en **curve selection** y se escogieron las curvas almacenadas en el paso anterior. Luego se hizo clic en la evaluación y en un mismo gráfico se juntaron todas las curvas seleccionadas, distinguidas por colores. Las propiedades de estas curvas fueron editadas a gusto para poder representar la información necesaria. Luego se dió evaluar y ya quedó obtenida la curva de enfriamiento según la Figura 26.

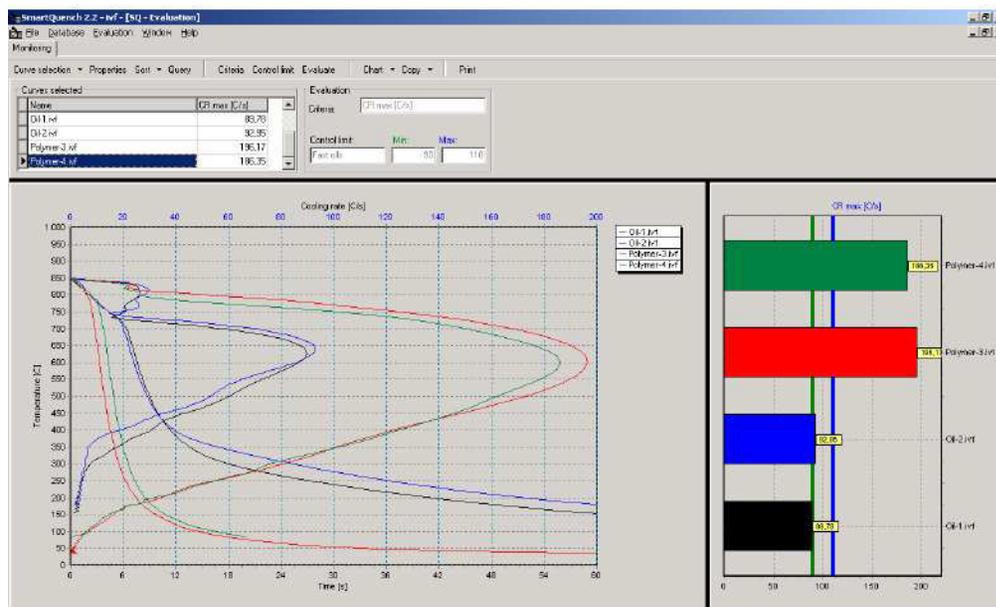


Figura 26. Curvas de enfriamiento y razón de enfriamiento

Después que se exportaron los datos de las curvas y se imprimieron como formato **.pdf*, también se cortaron y pegaron en los resultados del reporte para su posterior análisis.

Con esto terminó la fase de procesamiento y obtención de las curvas de enfriamiento y razón de enfriamiento cuyos datos fueron obtenidos con la unidad manual y luego convertidos por el programa en datos manipulables a través del método FFT (por sus siglas en inglés Fourier Fast Transform) el cual es un método que nos permite dar un tratamiento matemático en forma de filtrado digital a través de algoritmos en derivadas parciales al espectro obtenido en forma de señal.

3.3 PROCESAMIENTO DE DATOS OBTENIDOS (SEGUNDA FASE)

Para explicar esta parte se describió el procesamiento a través del software SQIntegra® de los datos obtenidos con la unidad manual.

Luego de verificar que la llave digital estaba introducida en la computadora iniciamos el software. Se estableció la unidad de temperatura y se definió un perfil de usuario para futuros cálculos, el cual fue guardado en la carpeta **C:\Program\VF\SQIntegra** folder.

En este módulo se podrá revisar la base de datos para visualizar las curvas de enfriamiento obtenidas, así como imprimir las curvas de razón de enfriamiento y además se puede hacer una estimación del coeficiente de transferencia de calor (HTC) a través del método inverso para la probeta standard ISO 9950.

Como el método inverso está basado en la estimación del HTC a través del cálculo directo de temperaturas con termopares como en este caso, se le debieron entrar determinadas propiedades al programa para hacerlo efectivo, como las propiedades térmicas de la barra, la temperatura del medio y las curvas obtenidas previamente.

Para realizar el cálculo seleccionamos la curva de enfriamiento en COOLING CURVE-DATABASE y ahí la escogemos. La curva es visualizada en la parte

inferior de la pantalla. Posteriormente creamos una **estimación inicial** que sirvió como valores iniciales de HTC para el cálculo. En esta parte seleccionamos una **estimación inicial** desde una carpeta que ya los traía preestablecidos y solo lo que teníamos que hacer era introducirle manualmente más o menos puntos de cálculo con su respectivo HTC inicial, los cuales se distribuirían desde 0 hasta 60 segundos que es la duración escogida del cálculo. Al introducirle una alta cantidad de puntos al cálculo en los segundos iniciales estábamos garantizando conocer bien el HTC en las fases de vapor y de ebullición nucleada que es donde se encuentran los valores más altos de la razón de enfriamiento, todo esto cuidando no escoger valores ni muy pequeños ni muy grandes de **time step** para no afectar la convergencia del método de cálculo.

Luego se selecciona el archivo **inconel600.mat** el cual contiene las curvas de conductividad térmica vs temperatura y calor específico vs temperatura de la probeta de Inconel que es la que estaba siendo usada. Al ser elegido este archivo, también se pudo visualizar y editar la posición del termopar y otros datos de interés de la probeta.

También se escogieron los parámetros del cálculo inverso, pero por recomendaciones del manual se dejaron por defecto y el cálculo no iba a ser perjudicado.

Para realizar la estimación se escogió **inverse calculation** y en el modo automático. De esta forma se realizaron de 3 a 5 cálculos por el software hasta que se detuvo y convergió. Una vez terminado esto, los gráficos de HTC vs temperatura, HTC vs tiempo y también las temperaturas internas y superficiales de la barra vs tiempo fueron mostradas. Estos gráficos y resultados se guardaron en formato ***.htc** para HTC(t) o ***.thtc** para HTC(T). También podían ser exportados para su uso en otro software.

Como trabajo de postprocesamiento se pueden cambiar los colores de las líneas y fondos de los gráficos, así como establecer límites para los ejes coordenados y cambiar la posición de la leyenda. Estos resultados se podían imprimir directamente o crear un reporte completo con otros datos de interés, así como las curvas más importantes, este se guardó como formato ***.pdf** para su posterior

estudio. Y de esta forma queda terminada la parte experimental con respecto al experimento Quencho test.

RESULTADOS

1. VELOCIMETRIA DE IMÁGENES DE PARTICULAS (PIV)

En este epígrafe se presentará lo concerniente a los resultados obtenidos a través de la técnica PIV.

1.1 IMÁGENES DE LOS CAMPOS VECTORIALES

Las imágenes presentadas son las exportadas por el software DYNAMICS STUDIO® 2015 luego de ser procesadas.

Los primeros resultados que se obtuvieron fueron los campos vectoriales los cuales se clasificaron de acuerdo a la velocidad de agitación a la que se ensayaron y la otra forma es en dependencia del corte realizado (*Figura 5 y Tabla 1*), por ejemplo, PROP 1MM BAJO o DER 10 MM. El orden jerárquico se puede observar en la Figura 27.

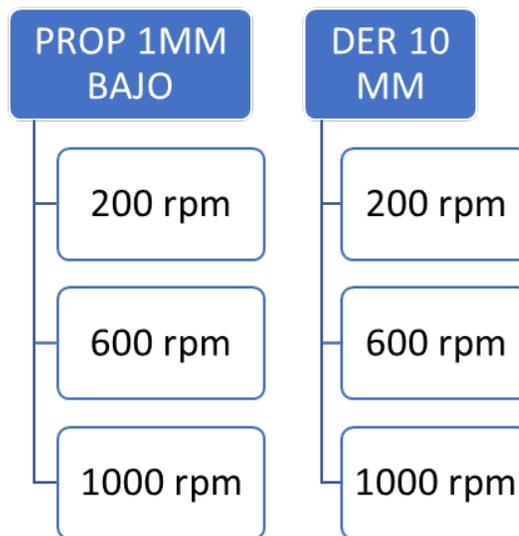


Figura 27. Clasificación de las imágenes

Como el objetivo de este capítulo no es documentar todas las figuras, solo se ilustra una por cada corte y las demás quedarán registradas en el APENDICE C, en el cual están organizadas todas las imágenes de vectores exportadas por el software.

El primer corte es PROP 1MM BAJO, y la imagen representada en la Figura 28 fue la de agitación a 600 rpm escogida pues presenta zonas muy bien definidas como la parte superior donde el movimiento fue provocado por la cercanía del agua con la propela, por lo que se pueden observar mayores longitudes de los vectores ya que hay más componente horizontal pensando en el experimento en su posición base (Figura 11). En la parte inferior este fenómeno no se aprecia de la misma forma debido a que el fluido ya ha recorrido más distancia y hay más verticalidad en la dirección de los vectores pensando en la posición base del experimento

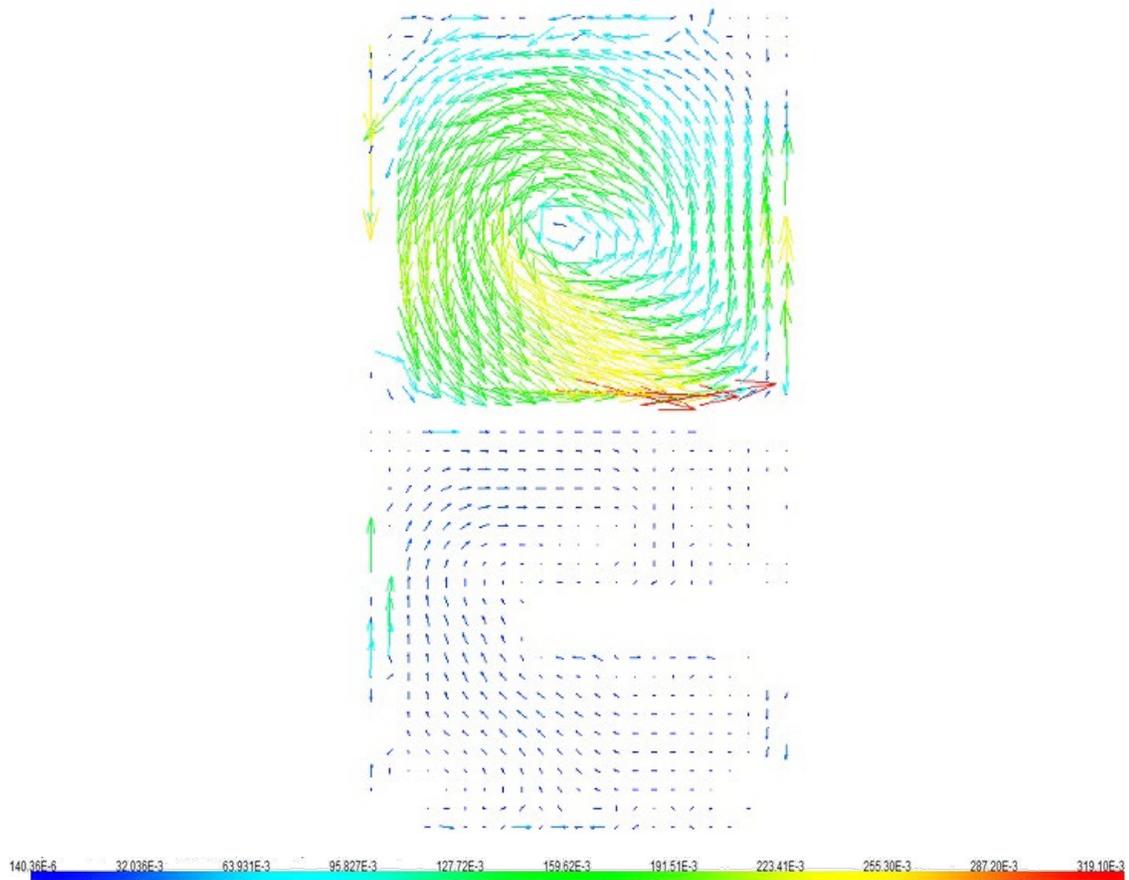


Figura 28. PROP 1MM BAJO 600 rpm

Por lo anteriormente planteado los vectores inferiores se parecen más a puntos. También hay una zona donde no hay información de vectores pues al incidir el láser desde la izquierda deja una sombra proyectada detrás de la barra. El corte BARRA 10 MM BAJO (Figura 29) ilustra muy bien en su parte inferior la

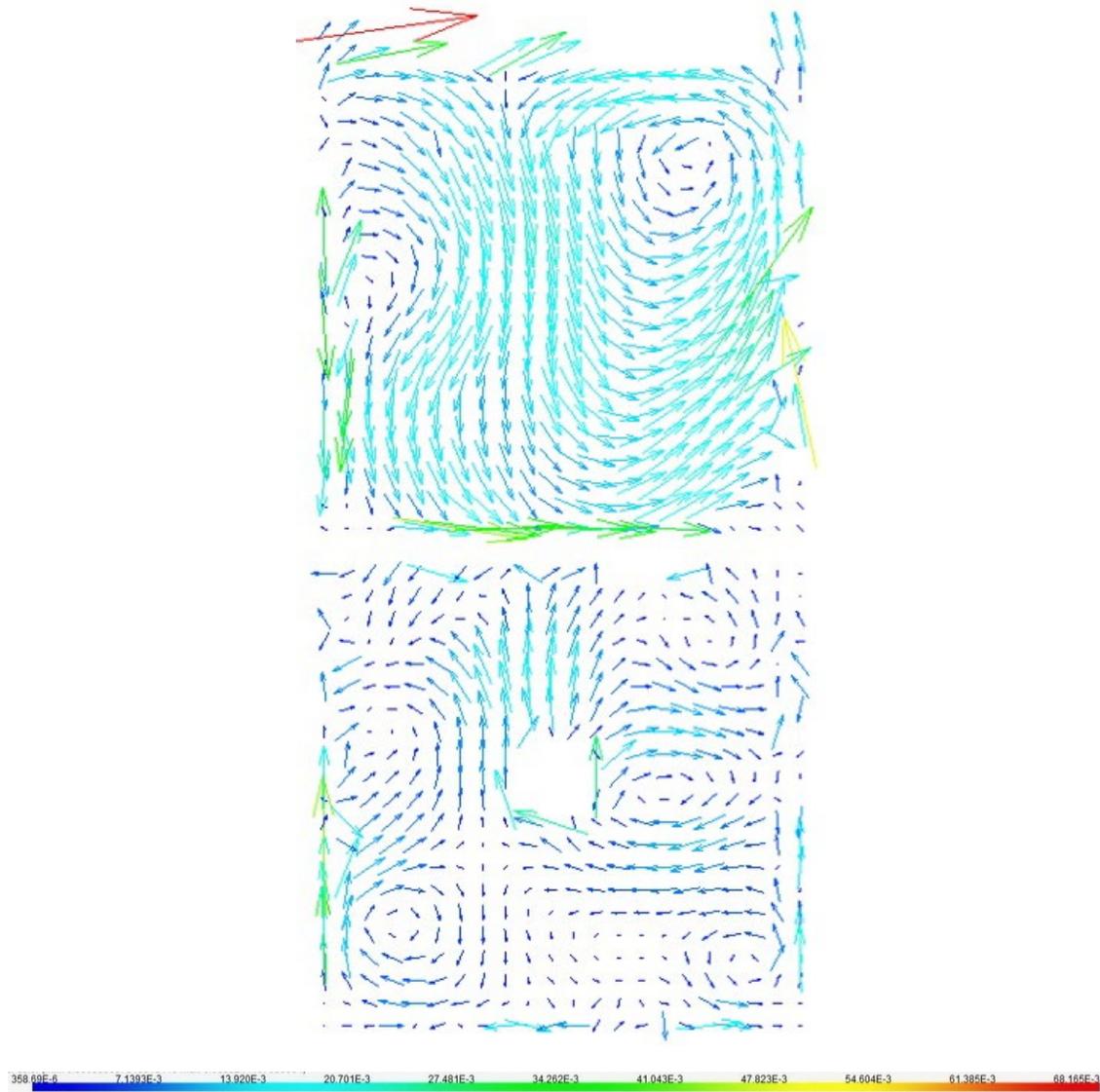


Figura 29. BARRA 10 MM BAJO 200 rpm

presencia de vorticidades en múltiples zonas cercanas a la barra lo que demuestra que a esta velocidad (200 rpm) hay mucha heterogeneidad en la velocidad del fluido cercano a la barra.

En el corte BARRA 10 MM SOBRE (Figura 30) se puede observar un área de color amarillo que muestra la mayor velocidad alcanzada por el fluido después de

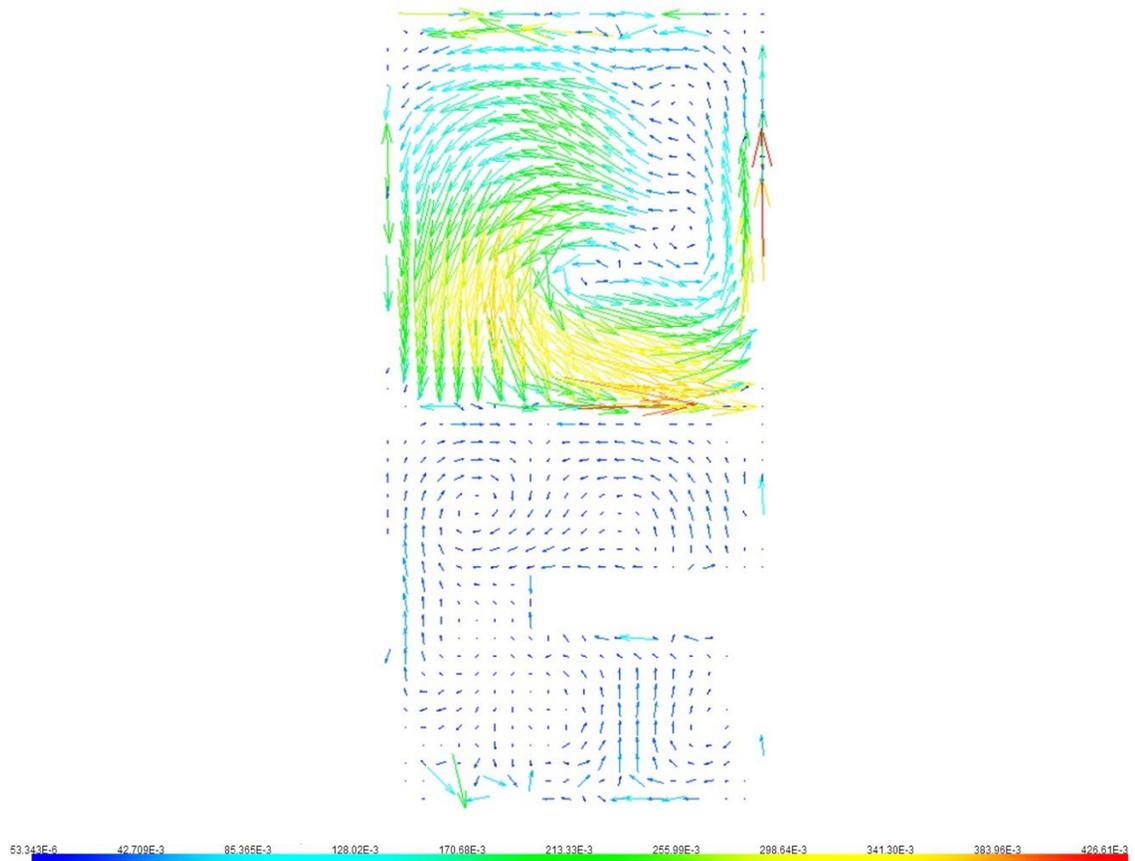


Figura 30. BARRA 10 MM SOBRE 1000 rpm

ser movido por la propela para este corte. Si se observa la escala de colores se puede identificar el valor de 0.3 m/s alcanzado el cual está en correspondencia con lo establecido por la gráfica de correlación entre la velocidad del flujo y la velocidad de rotación de la propela Figura 31.

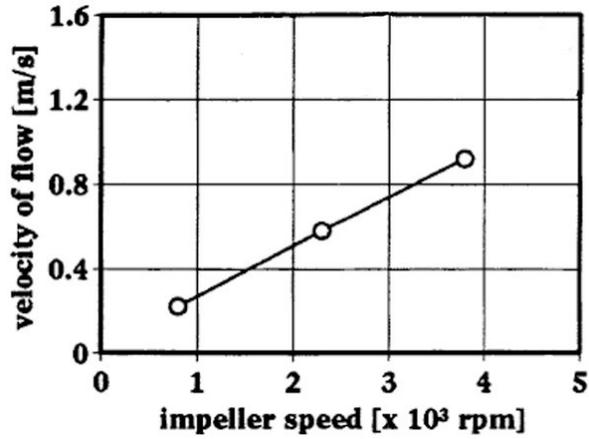


Figura 31. Correlación entre la velocidad del flujo en el tanque de temple y la frecuencia de rotación de la propela en agua [5]

El corte de la Figura 32 muestra, al igual que en la figura anterior, una banda de color amarillo para la cual el fluido tiene una velocidad de 0.44 m/s, la cual está en el mismo orden de magnitud según la curva de correlación de la Figura 31

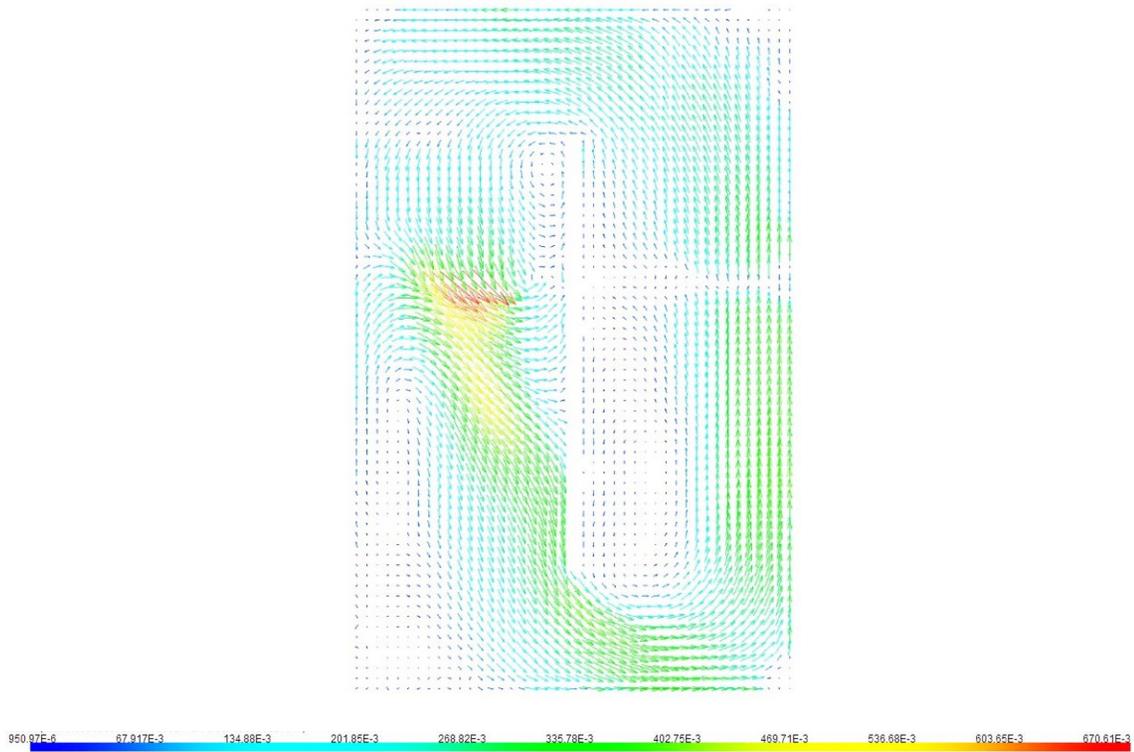


Figura 32. DER 10 MM 1000 rpm

En el corte DER CENT (Figura 33) se pueden observar las dos bandas de color amarillo correspondientes a las zonas donde el flujo tiene alrededor de 0.4 m/s, estas dos zonas representan el lugar donde está concentrada la mayor presión hidrodinámica que provoca el movimiento de la propela en el medio. También aparecen sin información o en blanco las áreas donde se encuentra la propela y detrás de la barra debido a la zona de incidencia del láser.

Independientemente de que hay zonas donde no se pudo detectar muy bien la información del fluido, en la Figura 34 se puede observar bien el cambio en el campo de velocidad que provoca la propela en el fluido, obligando a que el flujo se acerque mucho a las paredes izquierdas.

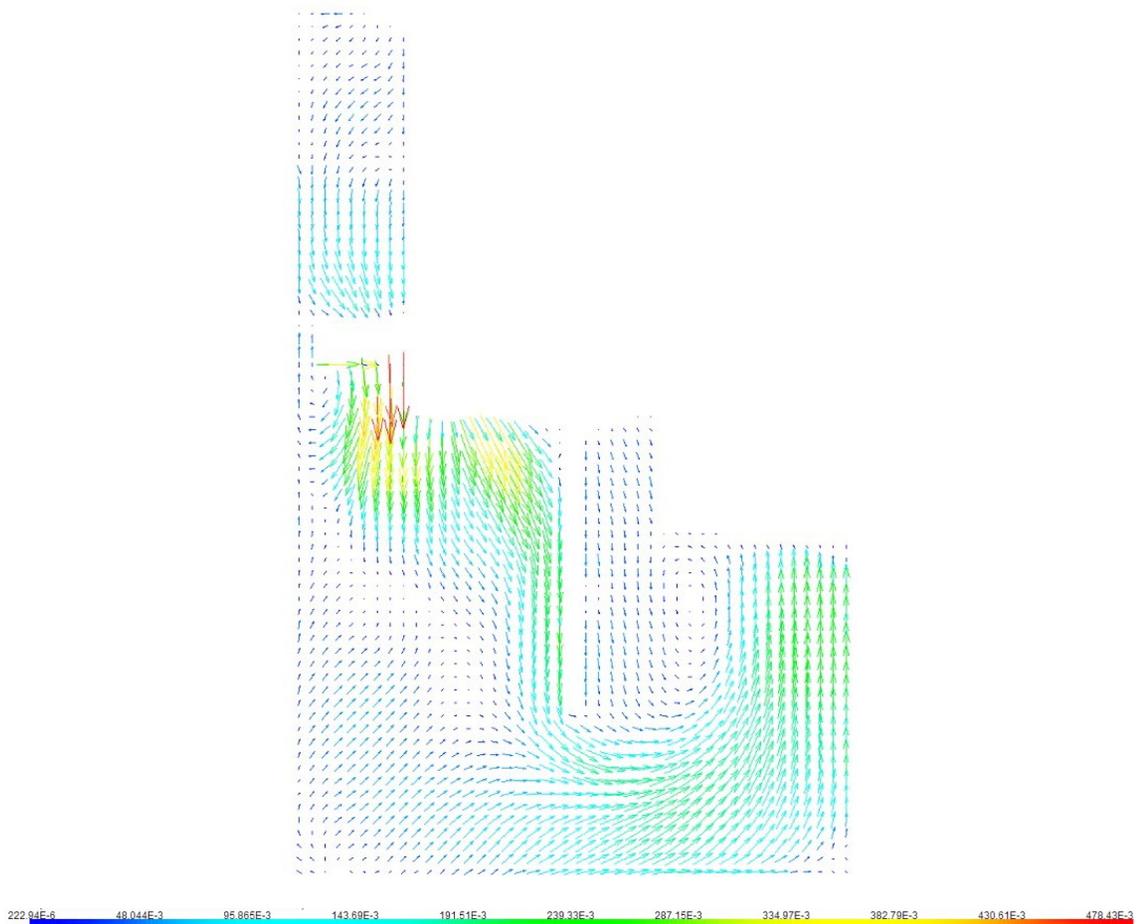


Figura 33. DER CENT 600 rpm

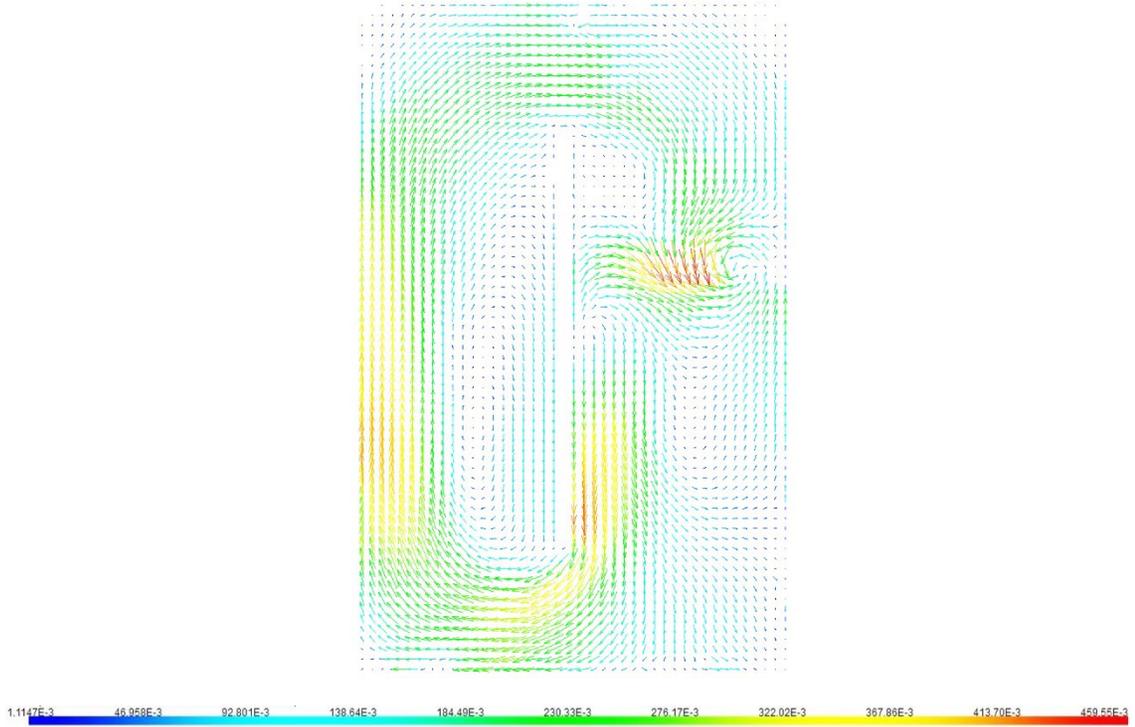


Figura 34. IZQ 10 MM 1000 rpm

En la Figura 35 correspondiente al corte IZQ CENT a 1000 rpm se puede

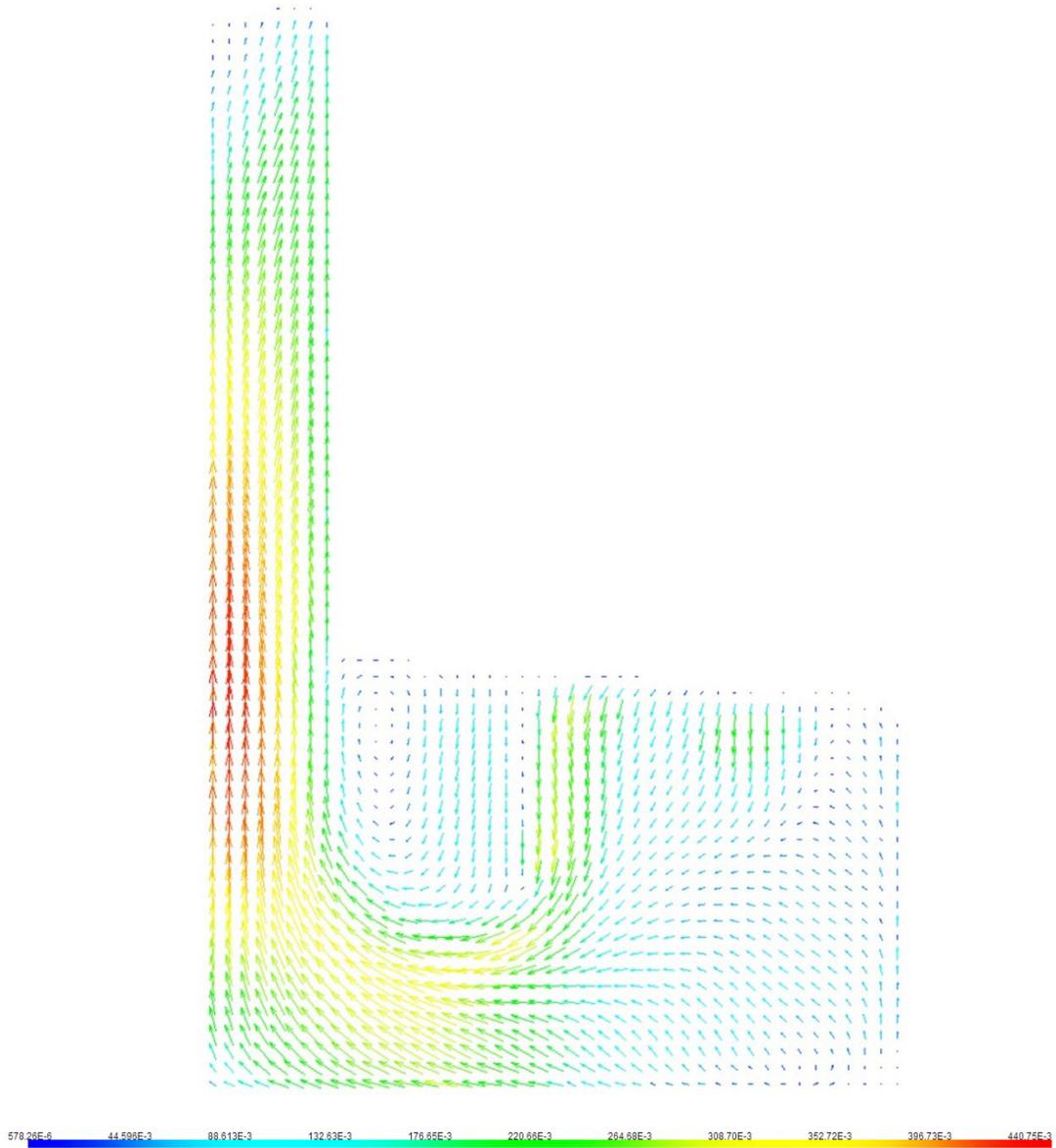


Figura 35. IZQ CENT a 1000 rpm

observar a través de una coloración rojiza en los vectores la velocidad alcanzada en la zona cercana a la barra y se ve que hay una zona de recirculación debido al cambio de sección.

Para el corte MEDIO 10 MM SOBRE a 200 rpm hay una presencia de bajas

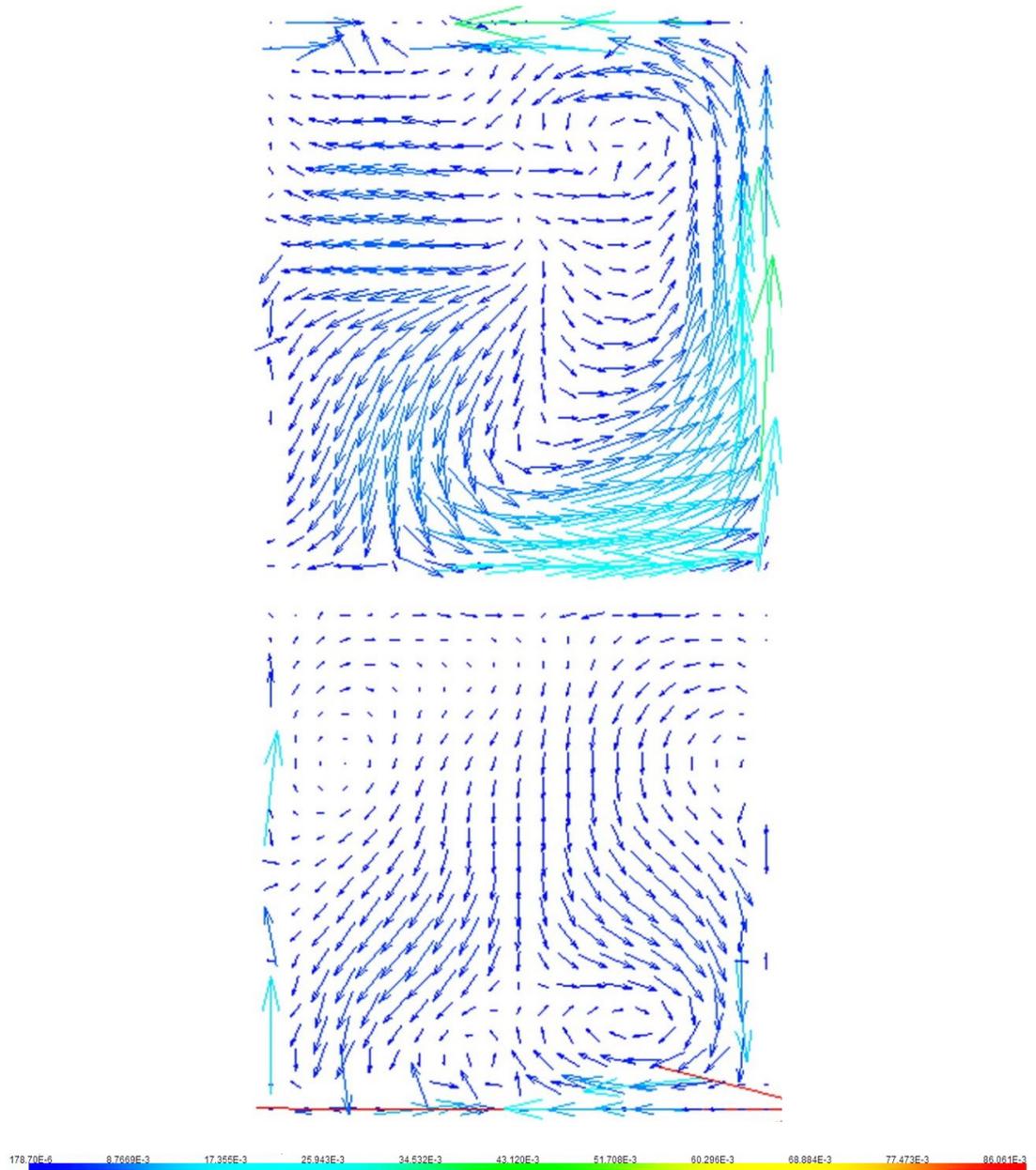


Figura 36. MEDIO 10 MM SOBRE a 200 rpm

velocidades de hasta 0.03 m/s debido a que este corte representa una posición muy baja en el Quenchttest, lo que indica una desaceleración del fluido. La zona blanca que divide por la mitad la imagen corresponde a la mampara intermedia del experimento. Esto se puede apreciar en la Figura 36.

En el corte MEDIO 10 MM BAJO de la Figura 37 se puede observar que no hay una división intermedia que perturbe el flujo pues este está en la parte más baja del Quencho-test y aquí se puede apreciar como el fluido se acelera con el cambio de sección que representa la mampara y se hace hacia el lado derecho debido a la rotación de la propela.

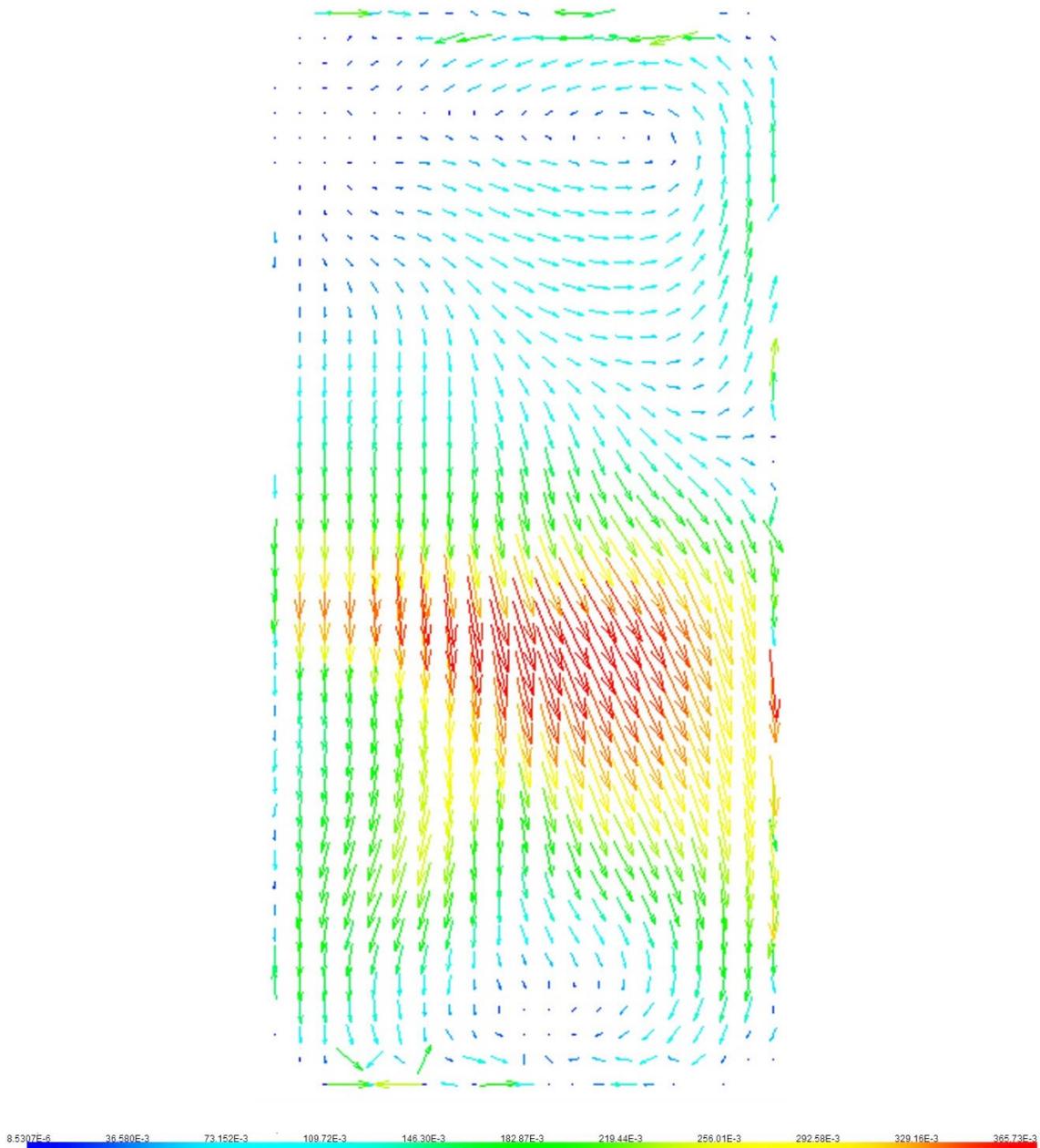


Figura 37. MEDIO 10 MM BAJO a 1000 rpm

1.2 ARCHIVOS CON INFORMACION DE POSICIONES Y VELOCIDADES DE LOS CAMPOS VECTORIALES DE LOS CORTES EN FORMATO *.CSV

Una de las grandes bondades que tiene el software DYNAMICS STUDIO® 2015 es que junto con las imágenes que exporta también guarda un archivo en formato *.csv muy útil para procesar en las hojas de cálculo de Microsoft® Excel®, este tipo de archivo es el más útil hasta el momento cuando de exportar datos a partir de softwares se trata y en este caso contiene todos los valores de las posiciones y velocidades de cada vector correspondiente a una velocidad de agitación determinada de un corte específico del Quenchtost. Esto se muestra en la Figura 38 y la lista con el nombre de los archivos se puede consultar en el APENDICE G.

	x	y	x [pix]	y [pix]	x [mm]	y [mm]	U [pix]	V [pix]	U [m/s]	V [m/s]	Rms U [pix]	Rms V [pix]	Std dev (U)	Std dev (V)	Sum(Var)	Covar (U)	Covar (V)
1016	53	8	1707.5	-1150.5	303.398041	-204.427202	-0.01048172	-0.00192019	-0.00186245	-0.00034119	0.0197691	0.01569584	0.00351268	0.00278892	2.01E-05	-4.74E-07	-0.00011303
1017	54	8	1723.5	-1150.5	306.24101	-204.427202	-0.01248905	-0.0024297	-0.00221912	-0.00043172	0.03884128	0.01390699	0.00690153	0.00247107	5.37E-05	5.05E-07	0.00011303
1018	55	8	1739.5	-1150.5	309.083978	-204.427202	0.01556833	-0.01370217	0.00276627	-0.00243468	0.11546862	0.01822142	0.0205171	0.00323768	0.00043143	1.06E-05	0.00011303
1019	56	8	1755.5	-1150.5	311.926947	-204.427202	0.03152435	-0.00592337	0.00560142	-0.0010525	0.07161433	0.02374671	0.01272483	0.00421945	0.00017973	3.70E-05	0.00011303
1020	57	8	1771.5	-1150.5	314.769915	-204.427202	-0.02107033	-0.00541177	-0.00374389	-0.00096159	0.1190536	0.02264593	0.0211541	0.00402385	0.00046369	-3.99E-05	-0.00011303
1021	58	8	1787.5	-1150.5	317.612884	-204.427202	-0.05447861	-0.01108573	-0.00968006	-0.00180986	0.12142404	0.020071	0.0215753	0.00356633	0.00047821	-3.29E-05	-0.00011303
1022	59	8	1803.5	-1150.5	320.455852	-204.427202	0.0495893	-0.01109217	0.0088113	-0.00197092	0.08485115	0.01971842	0.01507682	0.00350368	0.00023959	-4.05E-05	-0.00011303
1023	60	8	1819.5	-1150.5	323.298821	-204.427202	0.04743449	-0.00320434	0.00842842	-0.00056936	0.05499449	0.02357303	0.00977173	0.00418859	0.00011303	2.98E-05	0.00011303
1024	61	8	1835.5	-1150.5	326.141789	-204.427202	0.02600769	-0.00469658	0.00462119	-0.00083451	0.05136493	0.02013759	0.00912681	0.00357816	9.61E-05	1.80E-05	0.00011303
1025	62	8	1851.5	-1150.5	328.984758	-204.427202	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1026	63	8	1867.5	-1150.5	331.827726	-204.427202	-0.02744322	0.00186975	-0.00487626	0.00033223	0.04000001	0.03111007	0.00710742	0.00552781	8.11E-05	-3.94E-06	-0.00011303
1027	64	8	1883.5	-1150.5	334.670695	-204.427202	0.02206099	-0.00912251	0.00391992	-0.00162094	0	0	0	0	0	0	0
1028	65	8	1899.5	-1150.5	337.513663	-204.427202	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1029	66	8	1915.5	-1150.5	340.356632	-204.427202	-0.03748703	-0.02335675	-0.0066609	-0.00415016	0.06067159	0.02164597	0.01078046	0.00384618	0.00011301	4.15E-05	0.00011303
1030	67	8	1931.5	-1150.5	343.1996	-204.427202	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 38. Contenido de las hojas de datos

Como se puede observar en la figura anterior los datos aparecen ordenados por cantidad de vectores para los cuales está asociado un valor único de X y Y que a su vez tienen asociado un valor de posición X y Y en mm y las componentes U y V de la velocidad en m/s. Algo importante a destacar es que como están ordenados por niveles de Y, lo que significa que para el valor de Y=0 se ordenan de forma creciente todos los valores de X, esto provoca que se tenga información

de los vectores solo para ciertos valores de X y para otros las casillas estarán en 0. Es lógico observar que los valores de X, Y, U y V pueden tomar cualquier magnitud, dirección y sentido en dependencia del sistema de coordenadas que define el software de acuerdo con los valores reales de los vectores. Los valores para los cuales hay valor de posición y velocidad corresponde a las zonas donde hay fluido en movimiento dentro del experimento lo cual permite mapear cada corte con esta información. En dependencia de qué tipo de corte sea cada vector está separado de su vecino a una distancia determinada, la cual varía en función del intervalo de medición en ms. Este intervalo de medición es afectado por la distancia de la cámara al equipo medido, por la densidad del polímero en el agua en la zona en cuestión, y por el análisis estadístico de los vectores que realiza el software. El valor promedio de separación es 3.12 mm para ΔX y ΔY .

1.3 RESULTADOS DE MATLAB

Para organizar todos estos valores de una forma más entendible en una sola hoja de cálculo se hizo necesario utilizar el programa MATLAB® con licencia estudiantil para realizar ciertas operaciones y ordenar los valores de tal forma que se tenga la misma geometría del experimento en forma de valores de los vectores en la hoja de cálculo como muestra la Figura 39.

Además de las hojas con el arreglo de los valores de velocidades de los cortes, a través de MATLAB® se crearon hojas de cálculo similar a las anteriores pero esta vez con la propiedad que tienen los fluidos turbulentos llamada Energía Cinética Turbulenta (k) la cual es la energía cinética media por unidad de masa asociada con los remolinos en el flujo turbulento, y como apreciablemente no existen tales remolinos, este valor es relativamente muy bajo. También se obtuvieron las propias imágenes de vectores que se exportaron por DYNAMICS STUDIO® 2015 pero esta vez utilizando MATLAB® lo cual sirvió como comparación para seleccionar la técnica final de obtención de imágenes de vectores de la técnica PIV. Este tipo de imágenes se puede observar en la Figura

88 ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.del epígrafe 1.1 en el cual se discutió cual resultado fue el más aceptable.

Figura 39. Contenido de las hojas de datos arreglado con MATLAB® correspondiente al corte IZQ CENT

1.4 CONTORNOS DE VELOCIDAD CREADOS CON MATLAB®

El mayor aporte del software MATLAB® fue permitir la creación de contornos de velocidad a partir de crear zonas de color en dependencia del valor de cada vector. Estos contornos fueron creados con MATLAB® para servir como comparación con los obtenidos por FLUENT® y así verificar el nivel de ajuste de ambas técnicas a la realidad. Los contornos de cada velocidad correspondiente a cada corte están organizados en el APENDICE E.

Esto se puede observar en la Figura 40 la cual corresponde al corte PROPELA 1 MM BAJO 1000 rpm.

Los contornos de velocidad que aparecen en la Figura 41 y Figura 42 la única diferencia que tienen es que son tomados a una diferencia de altura de 20 mm

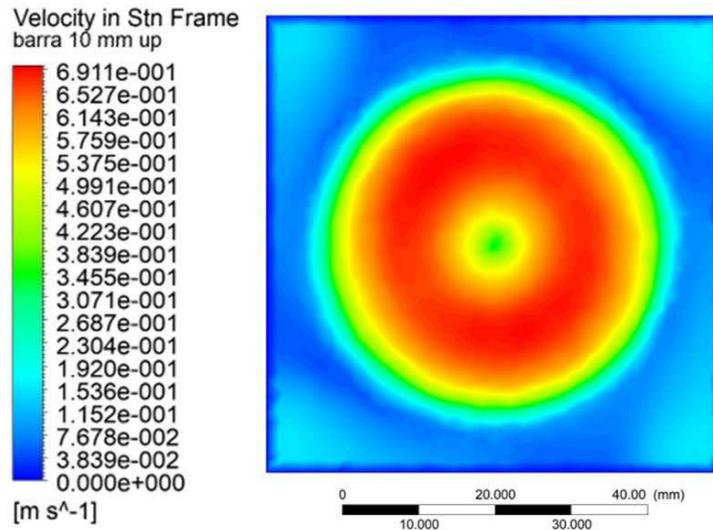


Figura 41. BARRA 10 MM SOBRE en la ZONA 1 a 1000 rpm

por eso es que su distribución de velocidades es casi igual por lo que se puede decir que el fluido está rotando hasta que sale de la ZONA 1. Este

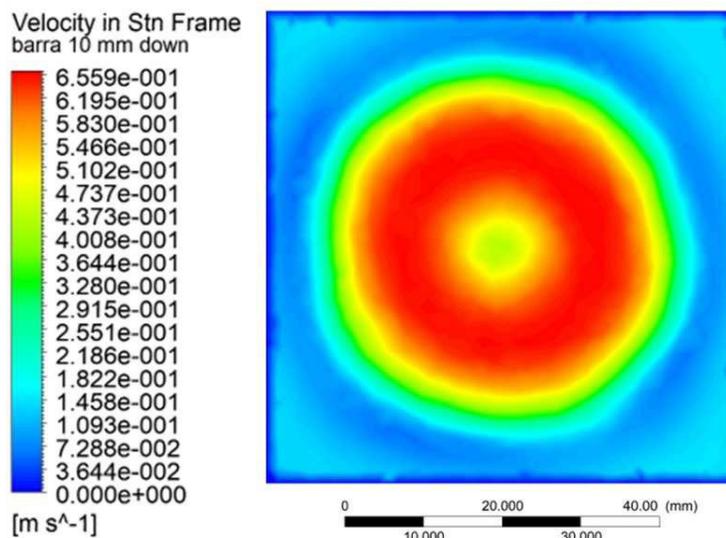


Figura 42. BARRA 10 MM BAJO en la ZONA 1 a 1000 rpm

comportamiento también se observa en la Figura 43, la cual corresponde al corte MEDIO 10 MM SOBRE a 1000 rpm. Y con lo anterior quedan explicados los cortes horizontales.

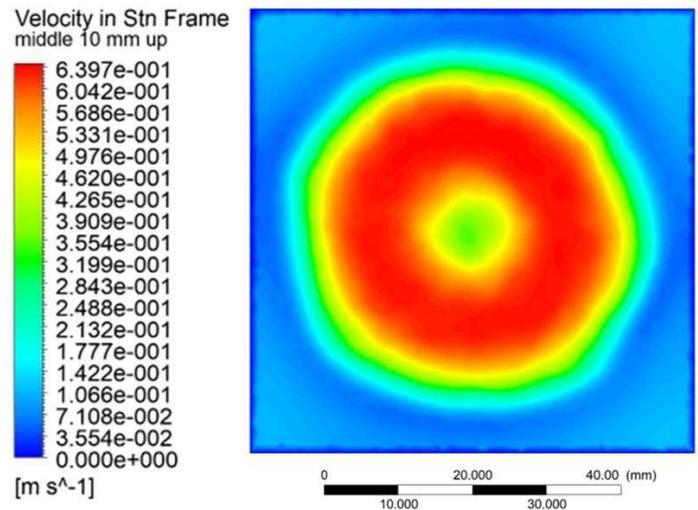


Figura 43. MEDIO 10 MM SOBRE en la ZONA 1 a 1000 rpm

Si analizamos los cortes verticales como el DER CENT (Figura 44) podemos observar mucho mejor la influencia sobre el fluido, definiendo una

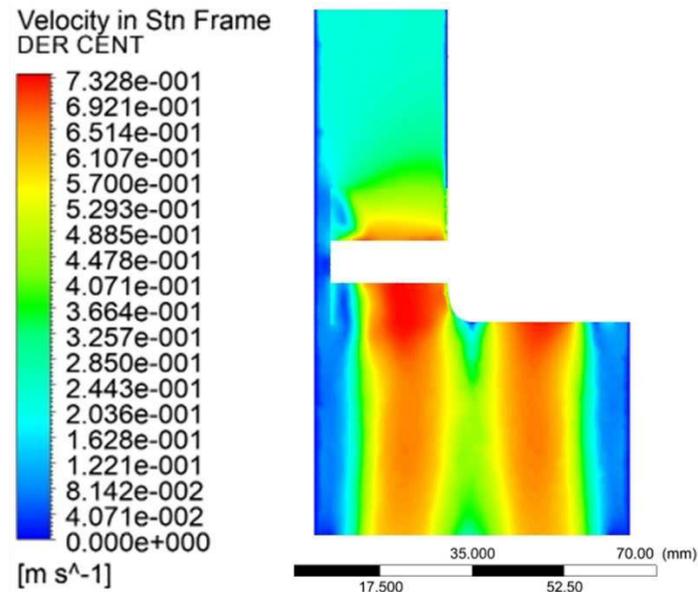


Figura 44. DER CENT en la ZONA 1 a 1000 rpm

escala de colores muy informativa sobre todo en las zonas cercanas a la propela al igual que con la Figura 45, el cual es el área visible de la ZONA 1 cuando el haz se hace incidir desde la izquierda.

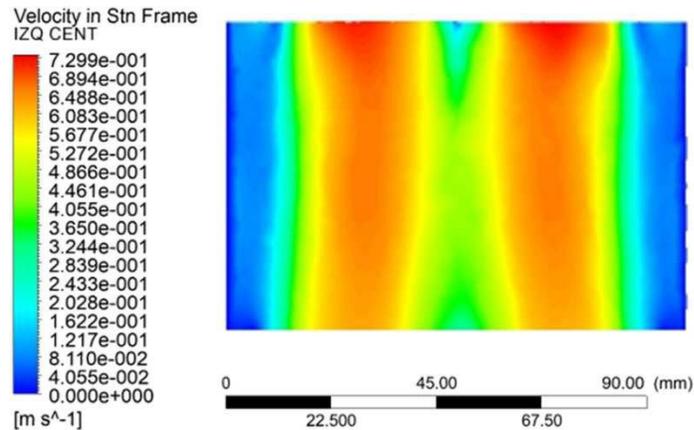


Figura 45. IZQ CENT en la ZONA 1 a 1000 rpm

En los contornos de la Figura 46 y Figura 47 pasa algo curioso, y es que como esos cortes se encuentran separados solamente a 10 mm de la propela, al momento de tomar la foto hay una parte de las aspas que incide con el láser y

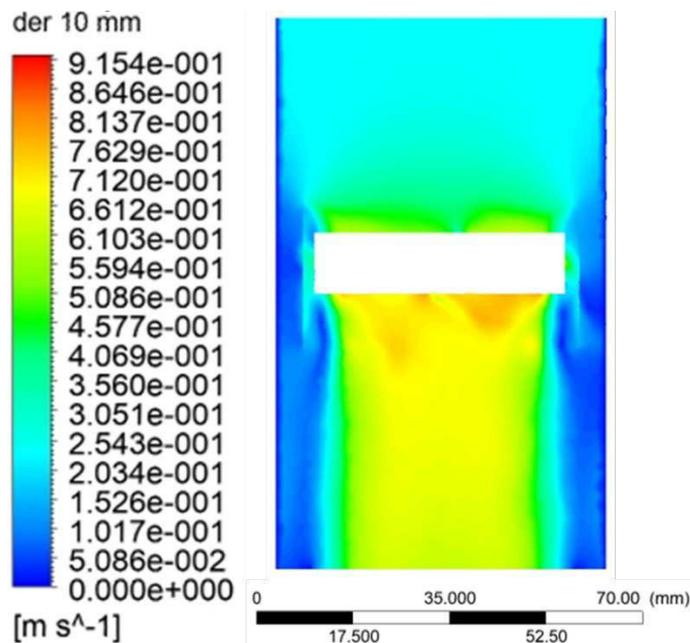


Figura 46. DER 10 MM en la ZONA 1 a 1000 rpm

deja una sombra (área sin información de velocidad para estos efectos) y esta área es la que se está omitiendo del contorno. El otro tema importante es que para los efectos de la simulación, cada vez que se define un contorno de velocidad la escala de colores se adecúa a los valores de velocidad que tiene el fluido y a los gradientes de concentración, por lo que al momento de unir los contornos de velocidad en la unificación de zonas (2.3) pueden haber incongruencias en los colores. Lo mismo se explica en ese epígrafe.

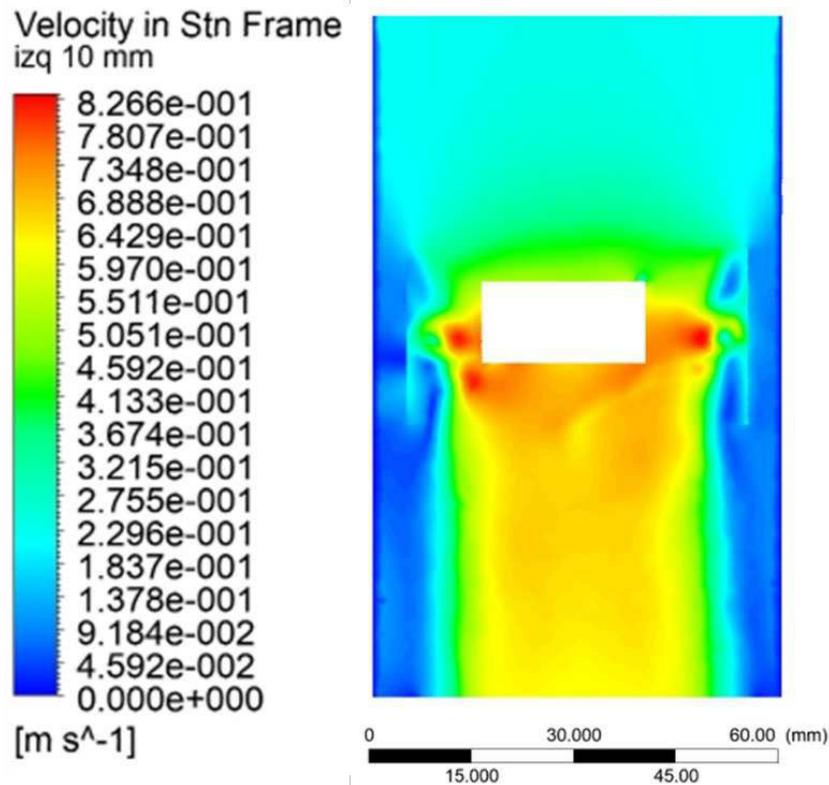


Figura 47. IZQ 10 MM en la ZONA 1 a 1000 rpm

Los contornos de velocidad restantes procedentes de las velocidades de agitación correspondientes a los valores de 600 rpm y 200 rpm muestran un comportamiento del flujo de fluidos similar a los obtenidos bajo la velocidad de agitación de 1000 rpm, no demostrando así diferencias apreciables o representativas, por lo que no se consideró necesario el análisis de los mismos.

VECTORES DE VELOCIDAD

Primeramente, se analizaron los vectores obtenidos a 1000 rpm y así se continuó con las restantes velocidades de agitación.

En la Figura 48 se puede apreciar que el fluido alcanza valores de hasta 0.7 m/s y en las esquinas casi no hay velocidad.

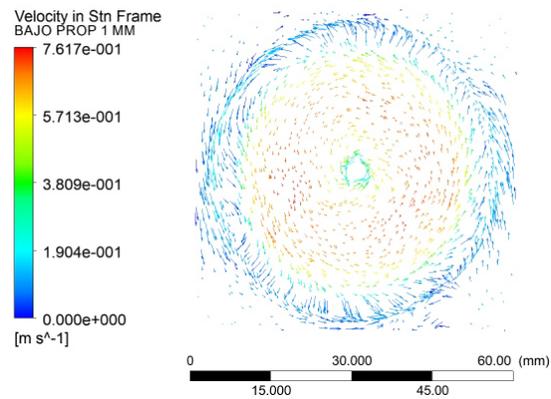


Figura 48. PROPELA 1MM BAJO en la ZONA 1 a 1000 rpm

A medida que el corte disminuye más en la altura, va disminuyendo la velocidad debido a que se aleja de la propela y esto se observa en la Figura 49, Figura 50 y Figura 51 , las cuales no tienen diferencia aparente salvo diferentes zonas de concentración de colores correspondientes a las velocidades de la escala.

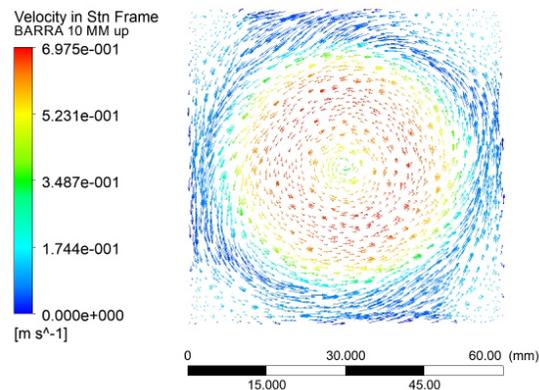


Figura 49. BARRA 10 MM SOBRE en la ZONA 1 a 1000 rpm

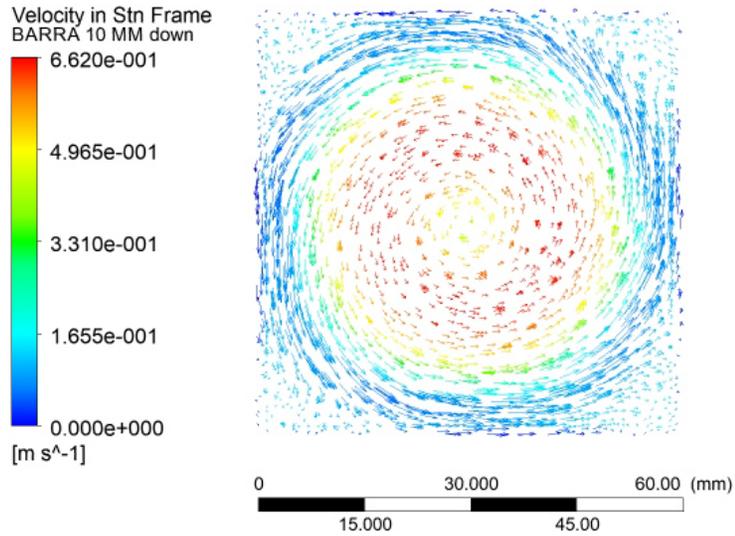


Figura 50. BARRA 10 MM BAJO en la ZONA 1 a 1000 rpm

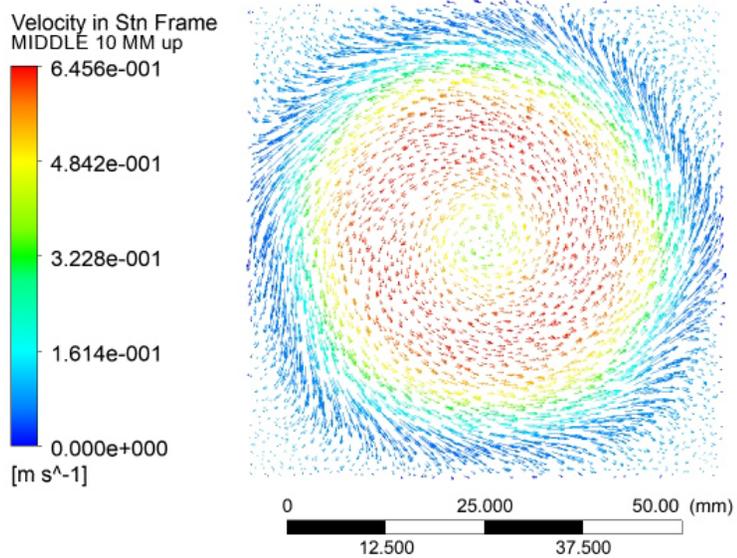


Figura 51. MEDIO 10 MM SOBRE en la ZONA 1 a 1000 rpm

La Figura 52, Figura 53 y demás restantes de esta velocidad de agitación son idénticas si a concentraciones de velocidades nos referimos. En ellas se pueden observar zonas de recirculación debido a los cambios de presión y aumento de velocidades por los cambios en área.

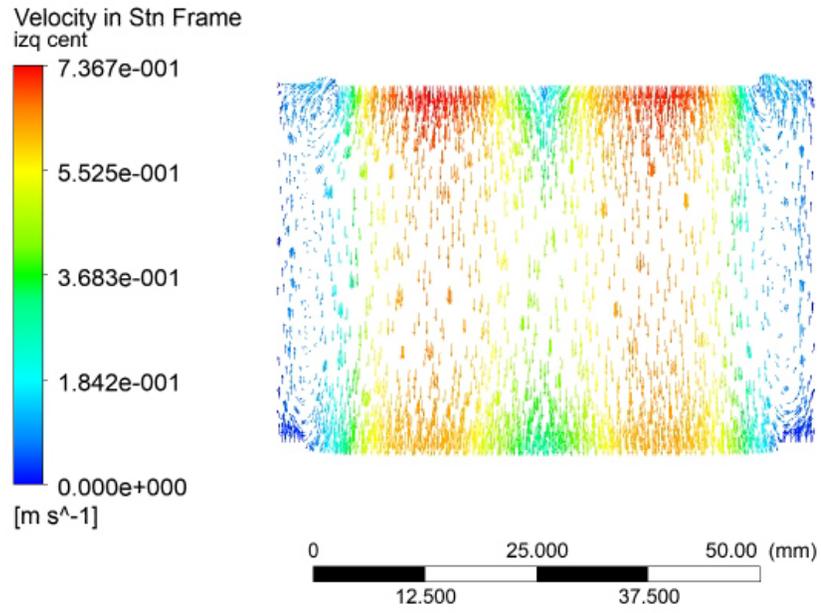


Figura 52. IZQ CENT en la ZONA 1 a 1000 rpm

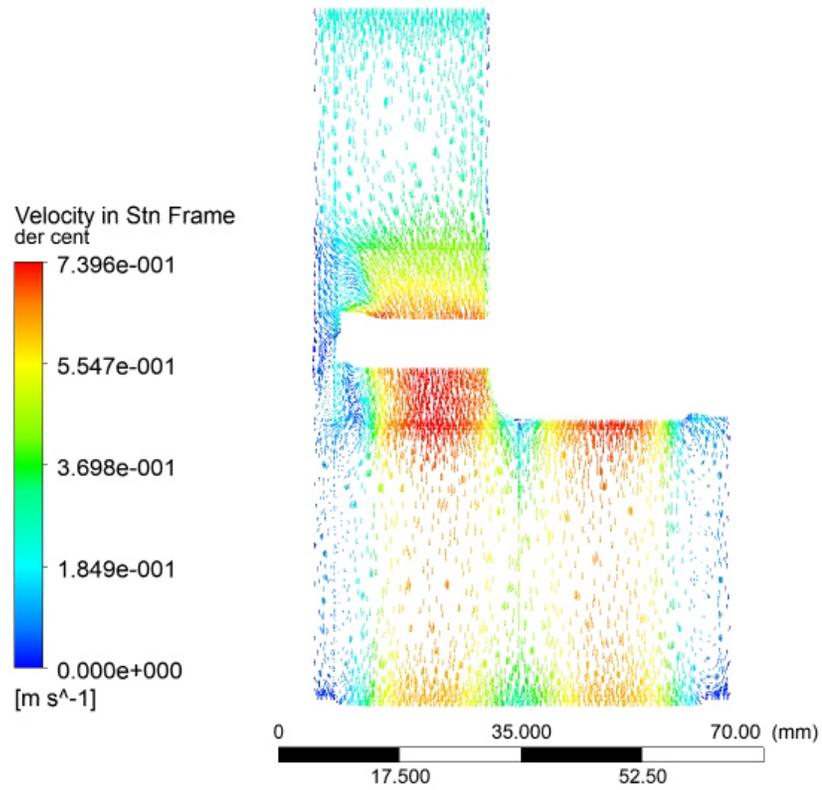


Figura 53. DER CENT en la ZONA 1 a 1000 rpm

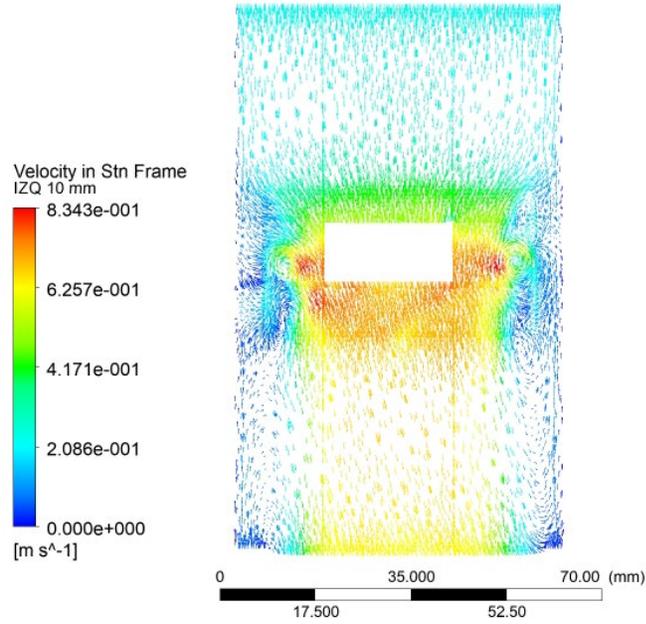


Figura 54. IZQ 10 MM en la ZONA 1 a 1000 rpm

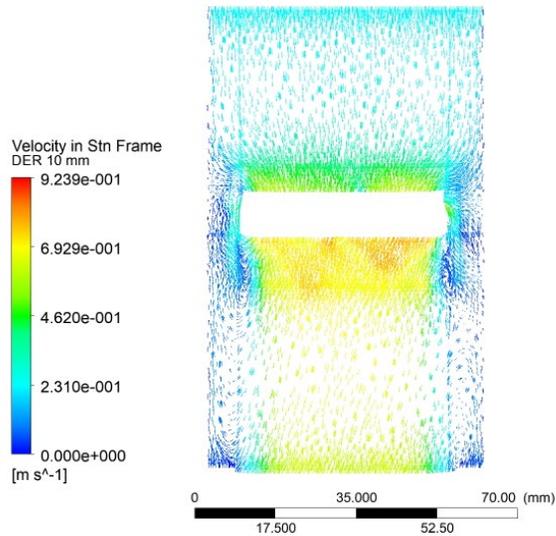


Figura 55. DER 10 MM en la ZONA 1 a 1000 rpm

Los vectores de velocidad restantes procedentes de las velocidades de agitación correspondientes a los valores de 600 rpm y 200 rpm muestran un comportamiento del flujo de fluidos similar a los obtenidos bajo la velocidad de agitación de 1000 rpm, no demostrando así diferencias apreciables o representativas, por lo que no se consideró necesario el análisis de los mismos.

2.2 ZONA 2

CONTORNOS DE VELOCIDAD

Primeramente, se analizaron las imágenes obtenidas a 1000 rpm y así se continuó con las restantes velocidades de agitación.

La Figura 56 muestra el contorno de velocidad en la zona de la barra (ZONA 2) obtenido por simulación, donde se puede apreciar una mayor concentración de valores altos de velocidad de acuerdo a la escala de colores debido a que el fluido se acerca a la pared al pasar por el cambio de sección tan rápido.

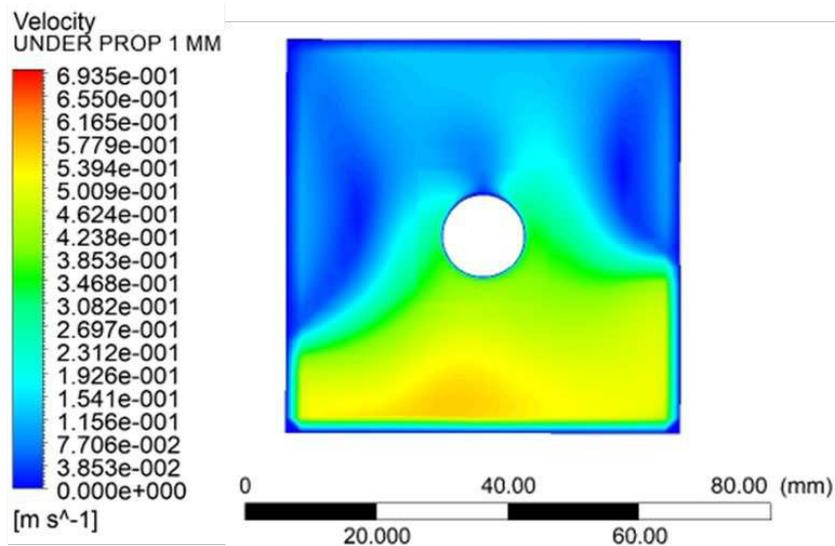


Figura 56. PROPELA 1MM BAJO en la ZONA 2 a 1000 rpm

Como se explicó anteriormente, al incidir el láser por la parte frontal del Quenhotest (Figura 5) este proyecta una sombra detrás de la barra que no permite obtener información del flujo de fluidos como se puede observar en la (Figura 57). En esta se puede observar una zona coloreada de rojo que indica que al igual que en la figura anterior, el fluido alcanza mayor velocidad en la pared.

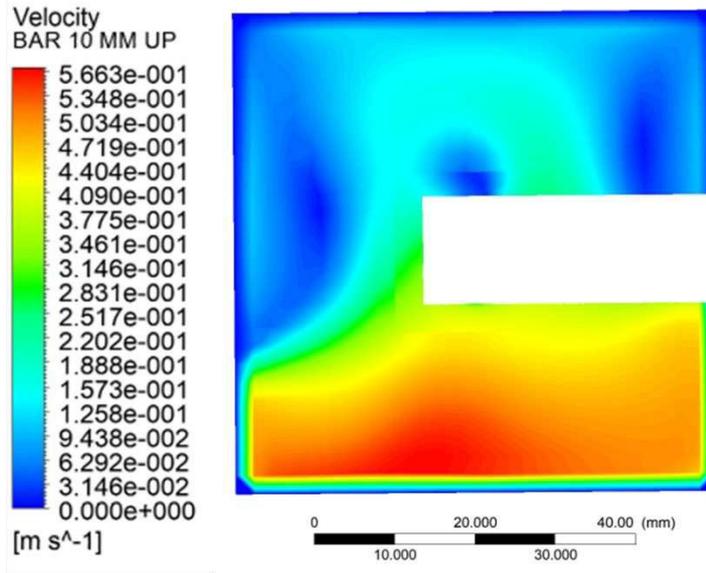


Figura 57. BARRA 10 MM SOBRE en la ZONA 2 a 1000 rpm

En las imágenes correspondientes a la Figura 58 y Figura 59 se observa claramente un comportamiento similar a las figuras anteriores para esta ZONA 2 donde el fluido se acomoda más a la pared como se menciona anteriormente.

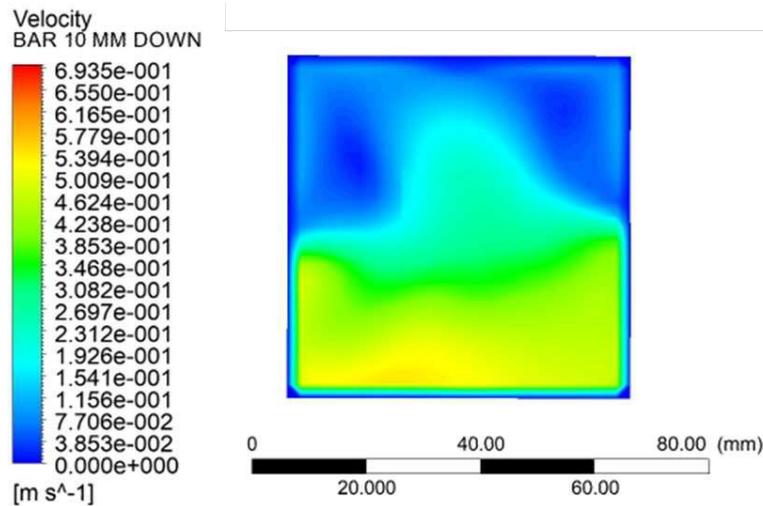


Figura 58. BARRA 10 MM BAJO en la ZONA 2 a 1000 rpm

La Figura 60, al pertenecer al corte MIDDLE 10 MM DOWN y no tener el fluido dividido por la pared central, muestra todo el contorno de velocidad del fluido en

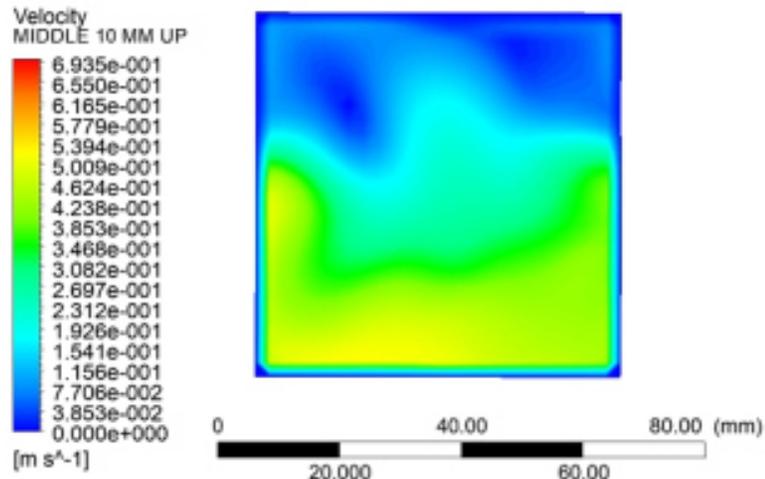


Figura 59 MEDIO 10 MM SOBRE en la ZONA 2 a 1000 rpm

el corte. En este podemos apreciar muy bien la zona superior la cual muestra un contorno muy bien definido en forma rotacional lo cual es evidencia del movimiento provocado por la propela, luego se acomoda a las paredes debido a la aceleración centrífuga para pasar a la zona de la barra hasta pegarse otra vez a la pared y subir.

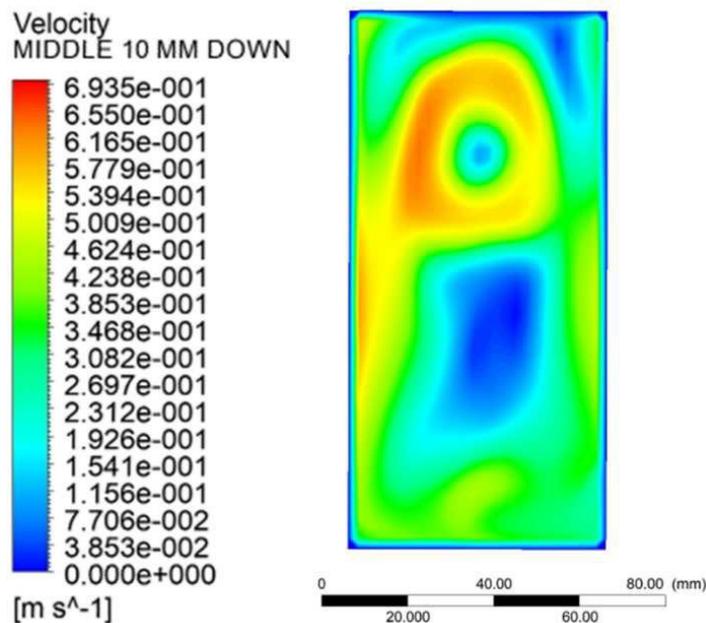


Figura 60. MEDIO 10 MM BAJO en la ZONA 2 a 1000 rpm

Con respecto al corte DER 10 MM se puede apreciar por la escala de colores en la Figura 61 que en efecto el fluido se acerca a la pared debido a la velocidad que tiene para nuevamente regresar a la propela. Con esto se validan las imágenes de los cortes horizontales anteriores.

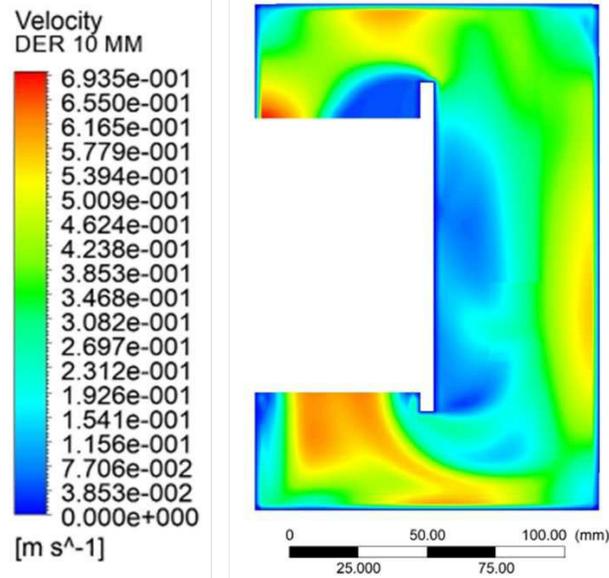


Figura 61. DER 10 MM en la ZONA 2 a 1000 rpm

Lo mismo se puede confirmar con la Figura 62, la cual a pesar de tener una forma

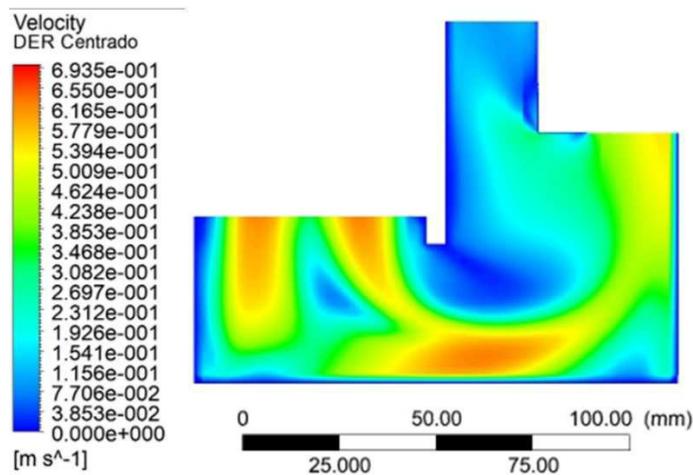


Figura 62. DER CENT en la ZONA 2 a 1000 rpm

algo extraña debido a que el corte es desde la derecha y tanto la propela que está en la ZONA 1 como la barra (Figura 132) no dejan ver una gran parte del comportamiento del fluido.

Con la Figura 63 pasa lo mismo que con la Figura 61, solo que están vistas desde sentidos opuestos.

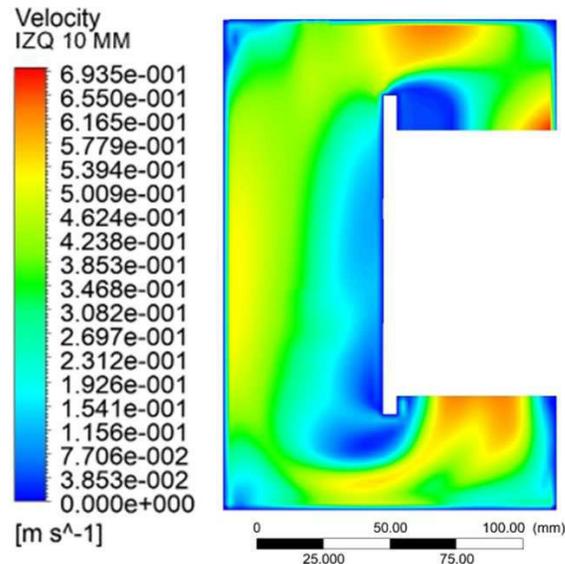


Figura 63. IZQ 10 MM en la ZONA 2 a 1000 rpm

La Figura 64 muestra un comportamiento similar a la Figura 62 solo que en esta

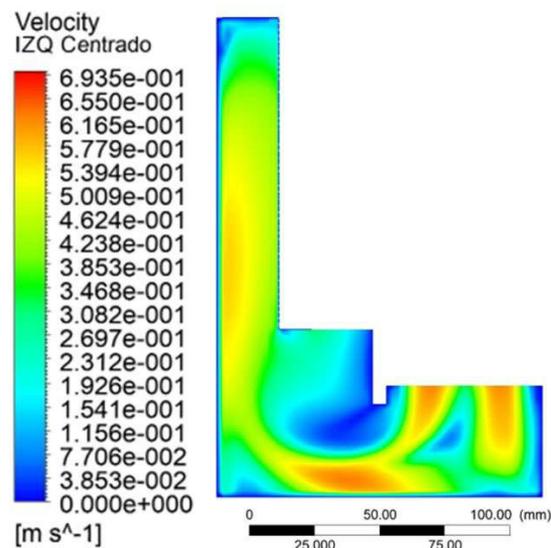


Figura 64. IZQ CENT en la ZONA 2 a 1000 rpm

se puede observar más el contorno de velocidad del fluido en la región cercana a la barra, el cual es uno de los objetivos principales de esta investigación. A simple vista se puede decir que en la zona cercana a la barra el fluido tiene una velocidad resultante de 0.46 aproximadamente.

Los contornos de velocidad restantes procedentes de las velocidades de agitación correspondientes a los valores de 600 rpm y 200 rpm muestran un comportamiento del flujo de fluidos similar a los obtenidos bajo la velocidad de agitación de 1000 rpm, no demostrando así diferencias apreciables o representativas, por lo que no se consideró necesario el análisis de los mismos. Estos se encuentran documentados en el APENDICE F.

VECTORES DE VELOCIDAD

Primeramente, se analizaron los vectores obtenidos a 1000 rpm y así se continuó con las restantes velocidades de agitación.

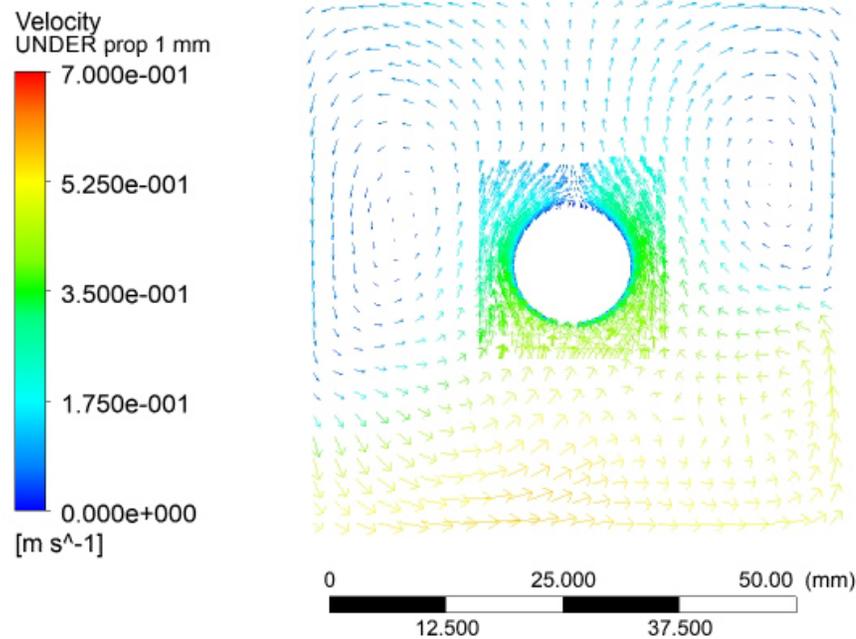


Figura 65. PROPELA 1MM BAJO en la ZONA 2 a 1000 rpm

La Figura 65 y Figura 66 muestra una distribución de vectores en distintas direcciones pero se puede alcanzar a observar que los vectores de color amarillo se concentran en la pared como en las imágenes de los contornos. Otra cosa a destacar es que como la zona de interés del experimento es el área cercana a la barra, la malla se hizo más fina intencionalmente para capturar este comportamiento y por este motivo en las imágenes se observa una mayor aglomeración de vectores en esta zona.

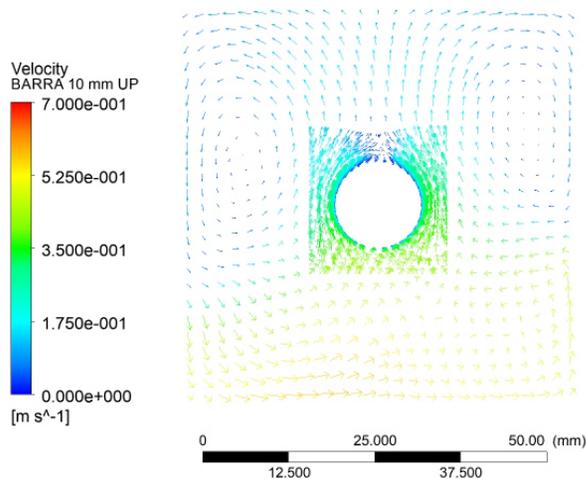


Figura 66. BARRA 10 MM SOBRE en la ZONA 2 a 1000 rpm

La Figura 67 y Figura 69 muestran lo mismo que las anteriores solo que en esta si hay información de fluidos en el centro de la pieza, lo cual ayuda mucho para entender cuál es su tendencia en esta zona.

Los vectores de velocidad correspondientes al corte MEDIO 10 MM BAJO en la ZONA 2 a 1000 rpm que se observa en la Figura 68 muestran una tendencia rotatoria en la parte superior provocada por la propela con cierta acomodación hacia los laterales y un comportamiento desordenado en la parte inferior.

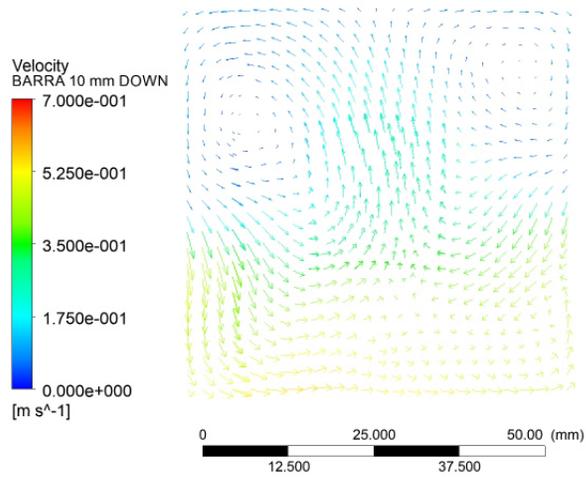


Figura 67. BARRA 10 MM BAJO en la ZONA 2 a 1000 rpm

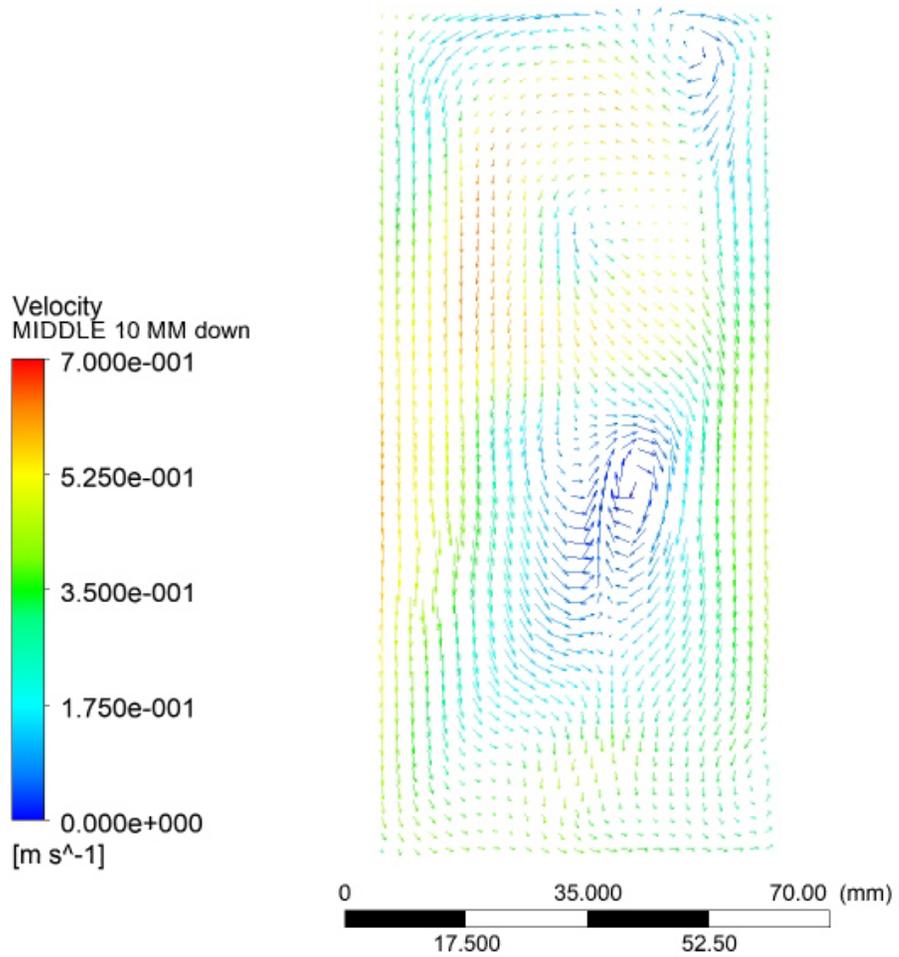


Figura 68. MEDIO 10 MM BAJO en la ZONA 2 a 1000 rpm

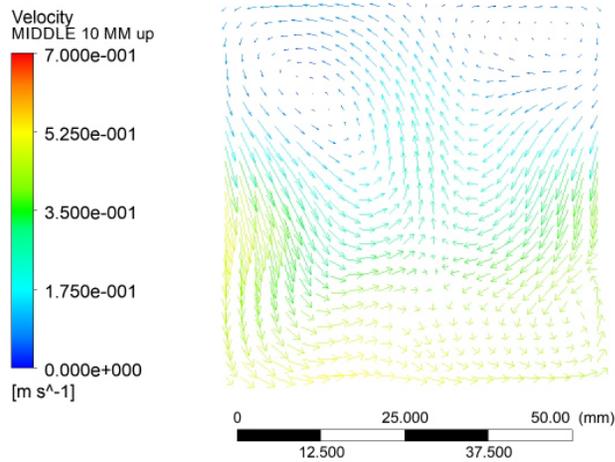


Figura 69. MEDIO 10 MM SOBRE en la ZONA 2 a 1000 rpm

El caso de la malla fina cerca de la barra se puede observar con mayor claridad en la Figura 70 y Figura 71 correspondientes a los cortes verticales. Aquí se puede observar la zona de recirculación del fluido por el cambio de sección y como un cambio en el área hace que aumente la velocidad si el flujo es constante.

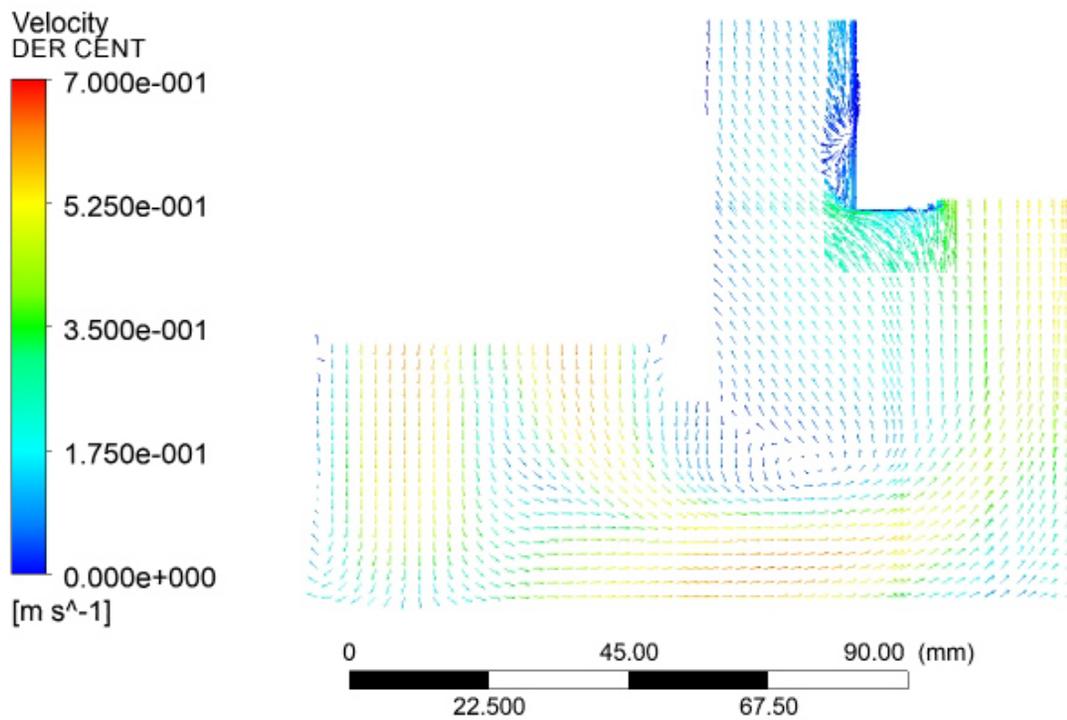


Figura 70. DER CENT en la ZONA 2 a 1000 rpm

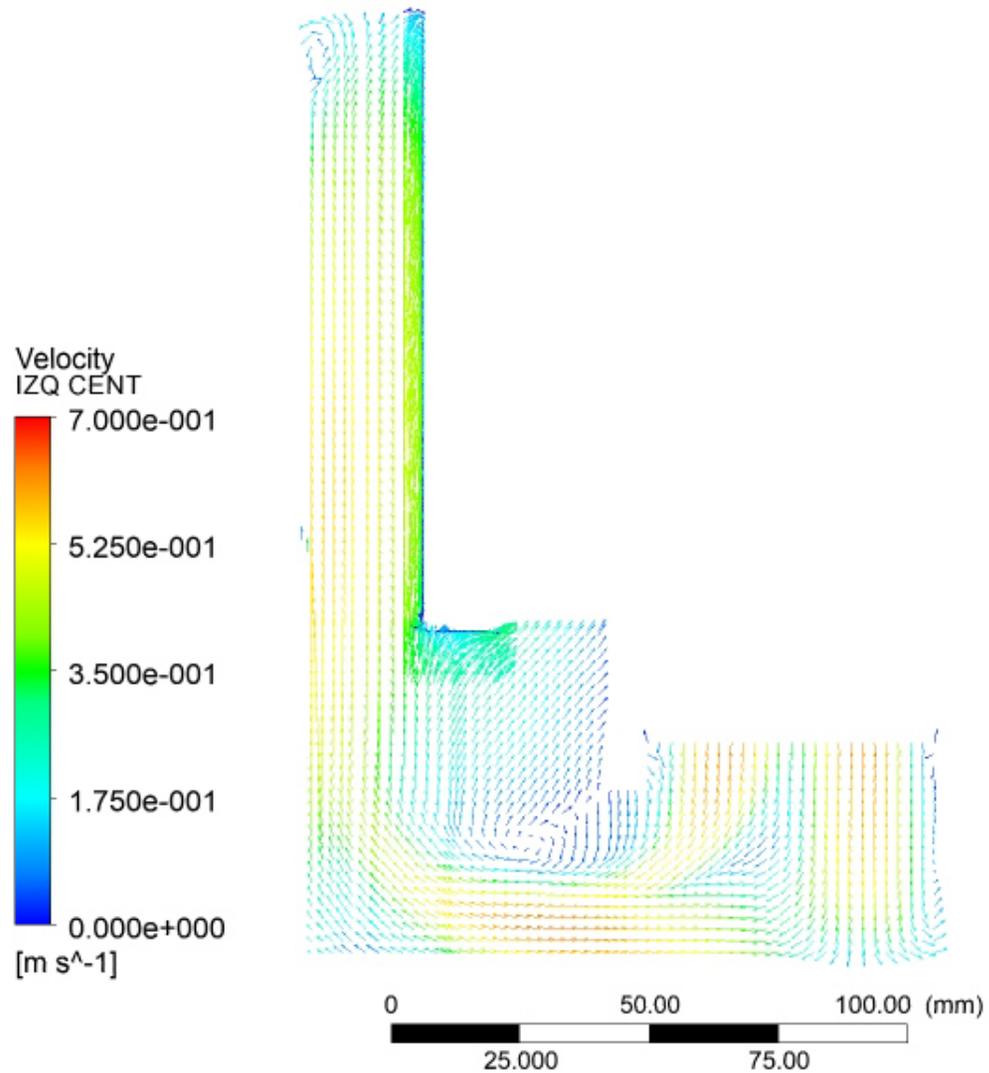


Figura 71. IZQ CENT en la ZONA 2 a 1000 rpm

Las restantes figuras muestran como se está comportando el fluido cuando alejamos el análisis a 10 mm del centro con un comportamiento totalmente lógico causado por el movimiento de la propela.

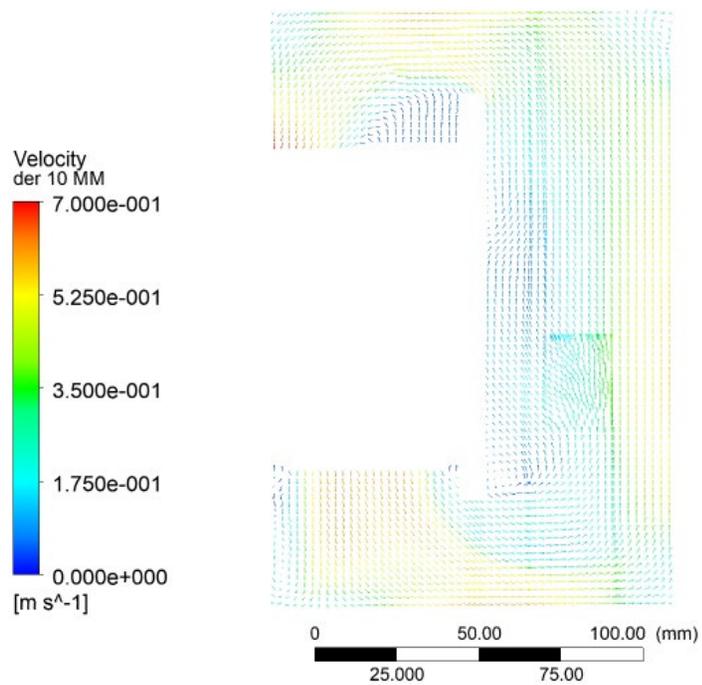


Figura 72. DER 10 MM en la ZONA 2 a 1000 rpm

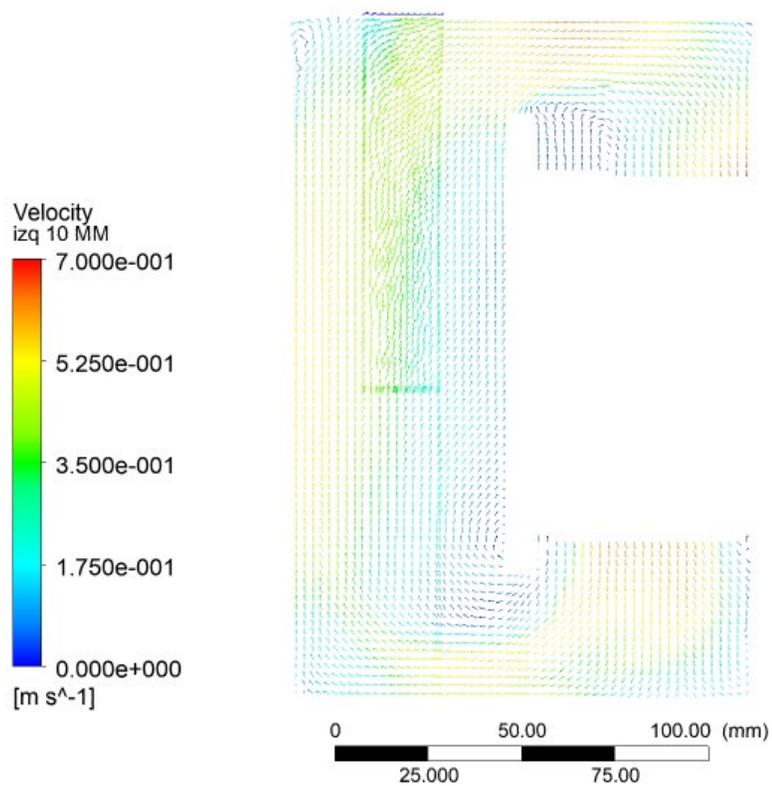


Figura 73. IZQ 10 MM en la ZONA 2 a 1000 rpm

Los vectores de velocidad restantes procedentes de las velocidades de agitación correspondientes a los valores de 600 rpm y 200 rpm muestran un comportamiento del flujo de fluidos similar a los obtenidos bajo la velocidad de agitación de 1000 rpm, no demostrando así diferencias apreciables o representativas, por lo que no se consideró necesario el análisis de los mismos

2.3 UNIFICACION DE ZONAS

Para la comparación de las imágenes obtenidas por FLUENT® y las obtenidas por simulación numérica a través de MATLAB® se hizo necesaria la unión de las imágenes de la ZONA 1 y la ZONA 2 en una sola.

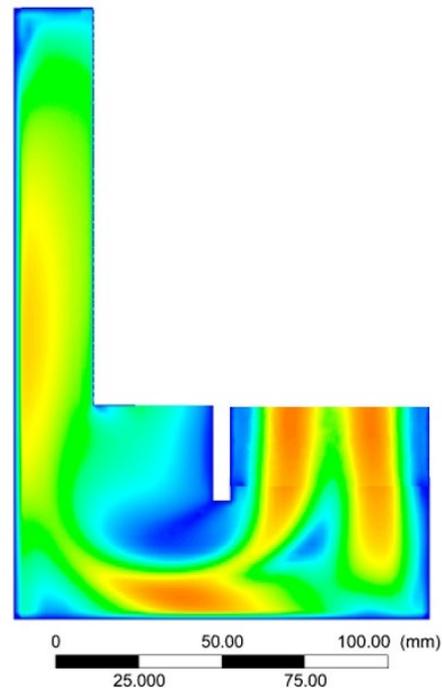


Figura 74. IZQ CENT (unida) 1000 rpm

Esto se logró a través del software gratuito GIMP el cual permitió obtener imágenes como la que se puede observar en la Figura 74. En esta se observa completamente el comportamiento del fluido teniendo las zonas de mayor velocidad en el área cercana a la pared.

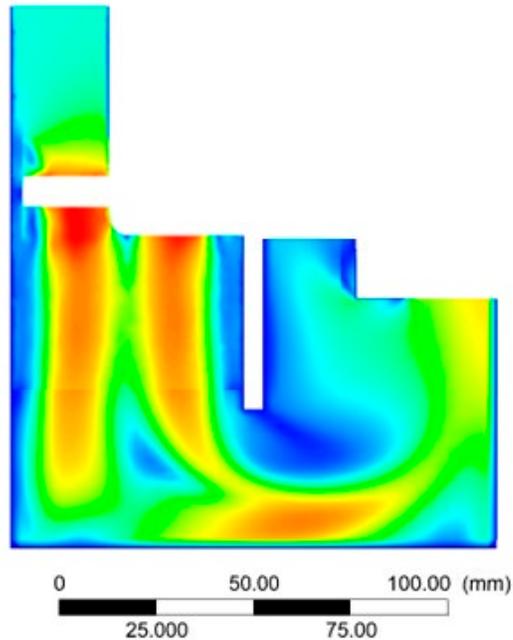


Figura 75. DER CENT (unida) 1000 rpm

En la Figura 75 se puede observar la unión de los dos cortes verticales DER CENT procedentes de las ZONA 1 y ZONA 2, no teniendo mucha diferencia de colores en la zona de unión de las imágenes.

Las incongruencias mencionadas a la hora de la unificación de zonas se pueden observar en la Figura 76 y Figura 77 donde debido a la concentración de altos valores de velocidad en el área cercana a la propela, hay un cambio en el gradiente de colores por lo que no se puede percibir una correcta unión en dicha zona, lo que no significa que tengan diferentes velocidades sino todo lo contrario pues para simular la ZONA 2 se tuvo que utilizar en la entrada el perfil de velocidades, posiciones, energía cinética turbulenta y la tasa de disipación turbulenta de la salida de la ZONA 1. También puede observarse una gran incongruencia entre la salida de la ZONA 2 y la entrada de la ZONA 1 debido a que el perfil de la salida de la ZONA 2 no se pudo realimentar en la ZONA 1 ya que al funcionar bajo el método de **sliding mesh** daba divergencia en el cálculo.

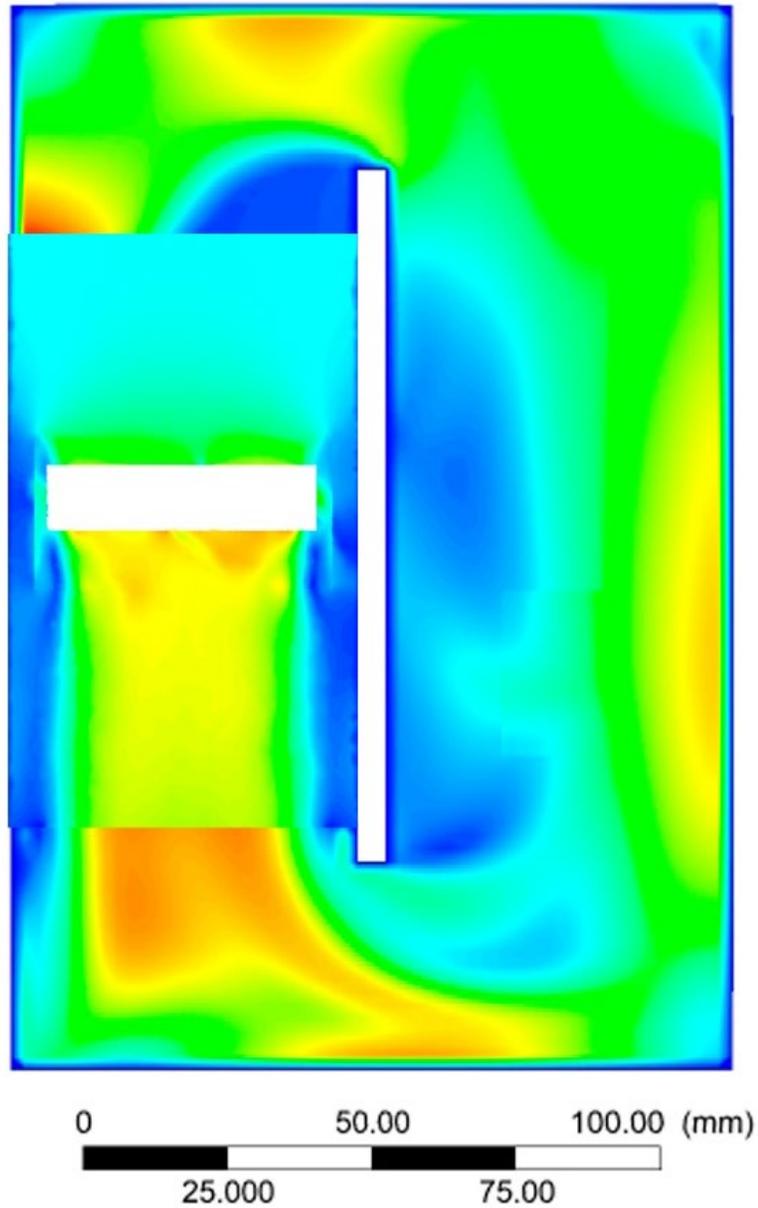


Figura 76. DER 10 MM (unida) 1000 rpm

Otra prueba de la validez de la aplicación del software se puede observar en la Figura 78 y Figura 79 donde el efecto de la propela y su frecuencia de rotación causan una acumulación de valores altos de velocidad hacia la pared. La zona faltante es debido a que cuando el láser se hace incidir desde la zona frontal, la barra deja un área de sombra de la cual no se tiene información del fluido.

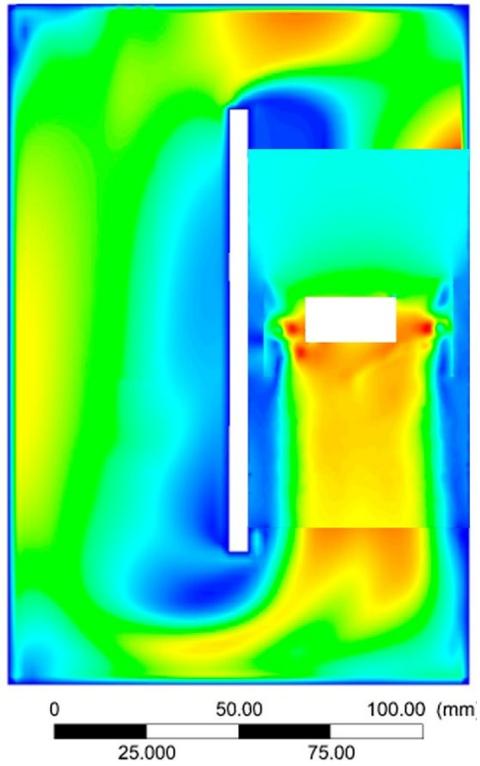


Figura 77. IZQ 10 MM (unida) 1000 rpm

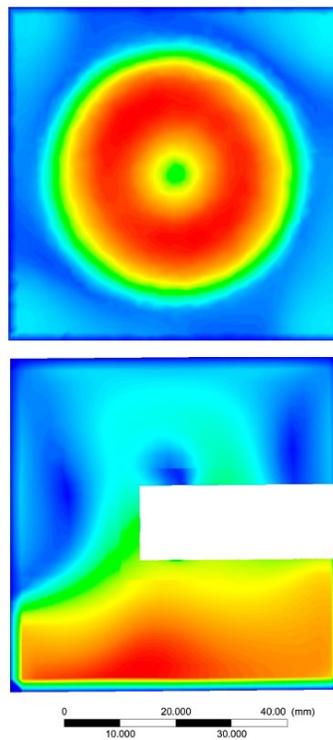


Figura 78. BARRA 10 MM SOBRE (unida) 1000 rpm

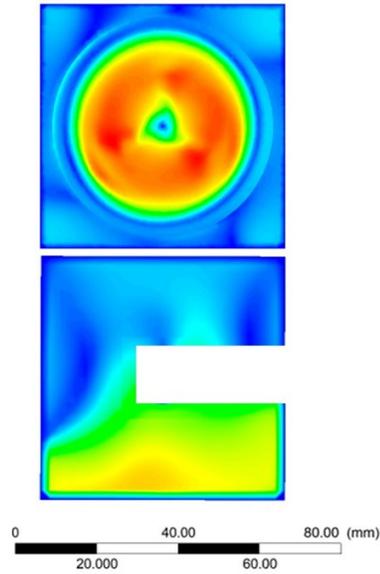


Figura 79. PROPELA 1 MM BAJO (unida) 1000 rpm

Con la

Figura 80 y Figura 81 pasa lo mismo que con las anteriores. El área circular es debido a que como la imagen fue tomada desde la vista inferior y al estar hecho el corte con el láser a solo 10 mm de la barra, esta última sale reflejada y no permite que se obtenga información válida del fluido.

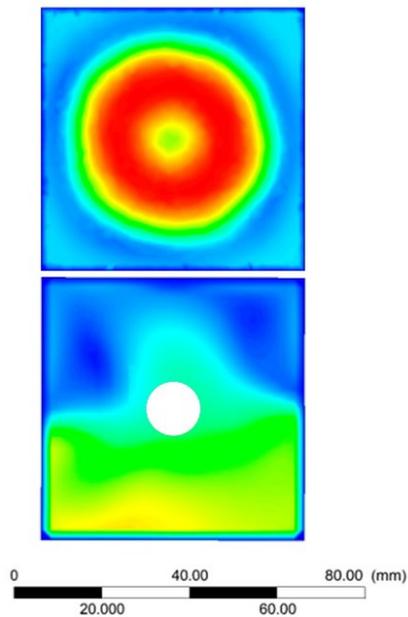


Figura 80. BARRA 10 MM BAJO (unida) 1000 rpm

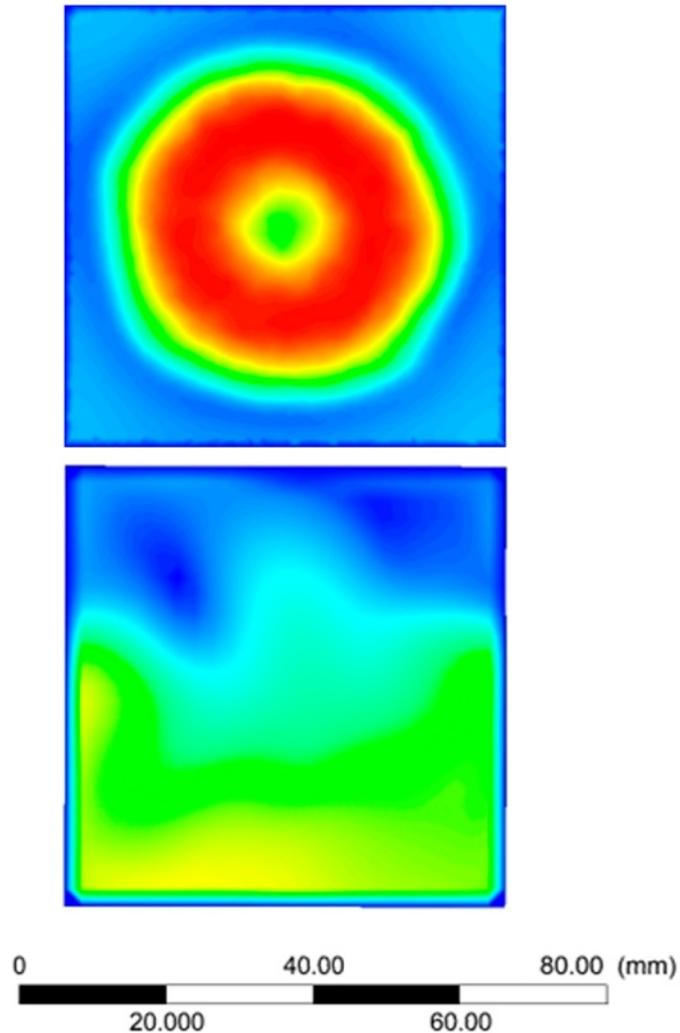


Figura 81. MEDIO 10 MM SOBRE (unida) 1000 rpm

Es válido mencionar que no existe un noveno corte el cual se haya tenido que unir debido a que MEDIO 10 MM BAJO queda exactamente 10 mm bajo la división del tanque y su contorno se obtiene completo.

La unificación de las imágenes de vectores de velocidad de las zonas, correspondientes a cada corte y a cada velocidad de agitación no se realizó por motivos prácticos ya que se obtendrían resultados similares a los que

observamos con los contornos unificados, con las mismas pequeñas incongruencias, pero en general el resultado es completamente válido y lógico.

3. EXPERIMENTOS QUENCHOTEST

Seguidamente se presentan los resultados obtenidos en el experimento real del Quenchotest y sus distintas fases de análisis en los módulos de obtención de las curvas de enfriamiento/razón de enfriamiento y de obtención del HTC vs T, todo lo anterior de acuerdo a cada una de las velocidades de agitación antes analizadas.

3.1 RESULTADOS DE LA PRIMERA FASE

La primera fase del experimento Quenchotest es la más importante pues es aquí donde se obtienen los datos de las curvas de enfriamiento de las barras sometidas a distintas velocidades de agitación, los cuales serán usados posteriormente para el cálculo del HTC.

Como podemos observar en la Figura 82 (primer experimento) la curva negra representa la probeta 1001 la cual según la Tabla 4 corresponde a una velocidad

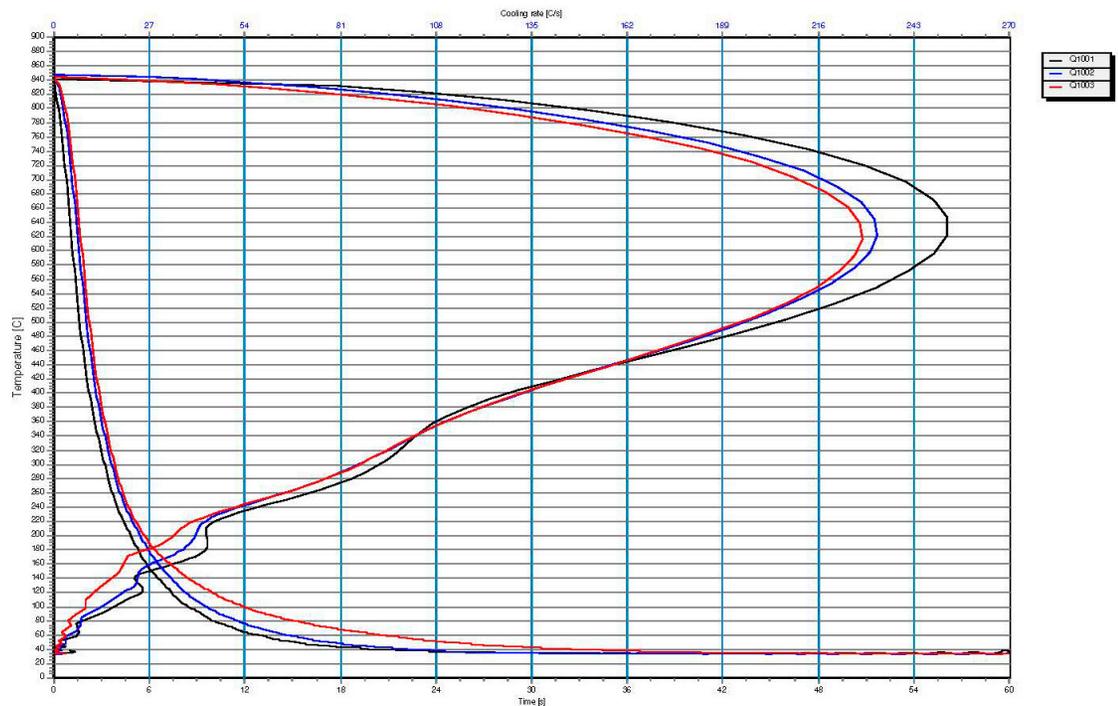


Figura 82. Curvas de enfriamiento/Razones de enfriamiento de las probetas 1001, 1002 y 1003

de agitación de 1000 rpm, así como las curvas azul y roja que pertenecen a las velocidades de 600 y 200 respectivamente. Aquí se observan razones de enfriamiento de 252.23, 232.85 y 228.01 °C/s a temperaturas de 650.14, 625.46 y 608.07 °C respectivamente.

En la segunda corrida experimental sucedió algo inusual que alteró el experimento en la velocidad de agitación de 200 rpm pues al pasar la probeta del horno al tanque hubo un pequeño retraso de más de un segundo que provocó un enfriamiento al aire como se observa en la curva roja de la Figura 83.

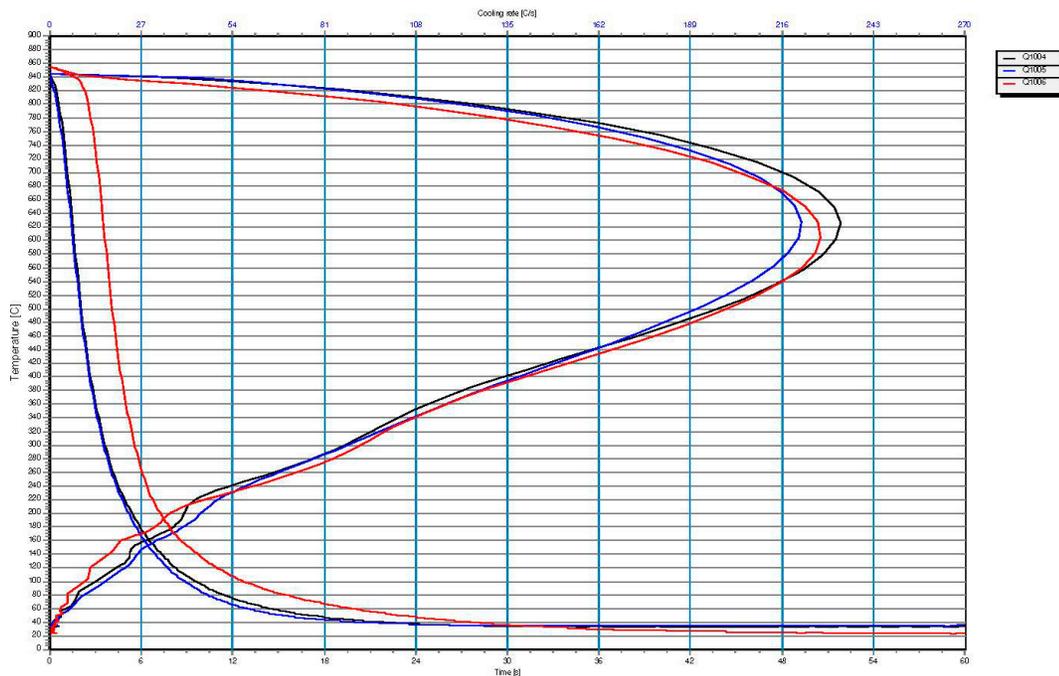


Figura 83. Curvas de enfriamiento/Razones de enfriamiento de las probetas 1004, 1005 y 1006

Aquí se observan razones de enfriamiento de 233.12, 221.24 y 227.5 °C/s a temperaturas de 629.37, 636.37 y 606.04 °C respectivamente para las tres probetas en orden creciente.

La última imagen representada en la Figura 84 fue el resultado del tercer y último experimento con el Quenchtost.

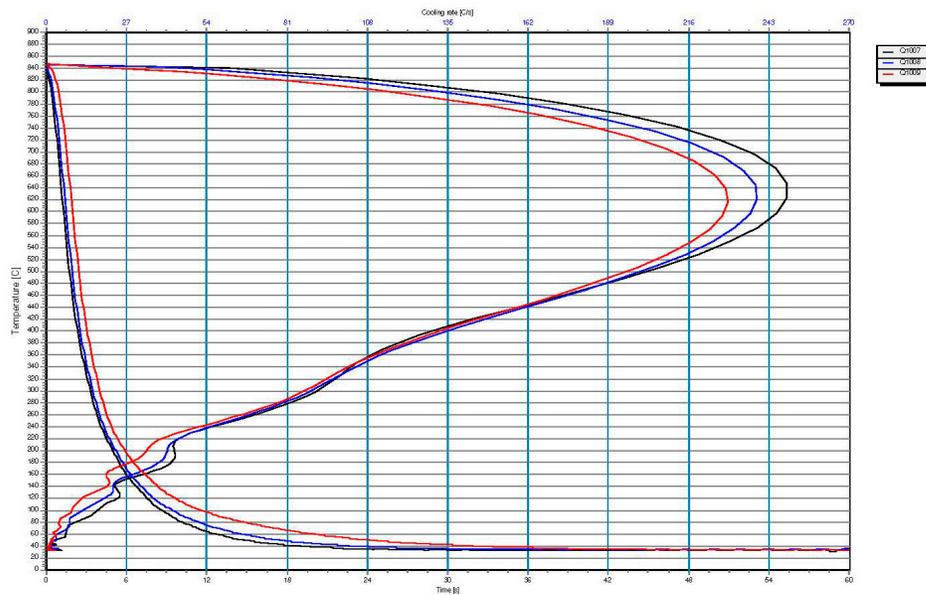


Figura 84. Curvas de enfriamiento/Razones de enfriamiento de las probetas 1007, 1008 y 1009

En esta imagen las probetas alcanzan los valores de razón de enfriamiento de una forma muy uniforme y espaciados correctamente a 10 °C/s por lo que se puede decir que esta corrida fue la más estable en cuanto a resultados con razones de enfriamiento de 249.33, 239.21 y 229.27 °C/s a temperaturas de 645, 630.27 y 626.07 °C respectivamente para las tres probetas en orden creciente. Para una información más completa y resumida del experimento, en el APENDICE H están los reportes completos de la obtención de las curvas de enfriamiento del experimento.

3.2 RESULTADOS DE LA SEGUNDA FASE

Los resultados de esta segunda fase fueron los reportes (APENDICE I) que se obtienen al procesar las curvas de enfriamiento obtenidas por la unidad manual. En la Figura 85 se puede observar la gráfica obtenida por el método inverso del cálculo del coeficiente de transferencia de calor convectivo (HTC) para la probeta

1001. Habiendo hecho esto y según la Figura 85 se puede observar que hubo un error en el cálculo pues el valor de HTC solo fue registrado a partir de 380 °C en el enfriamiento.

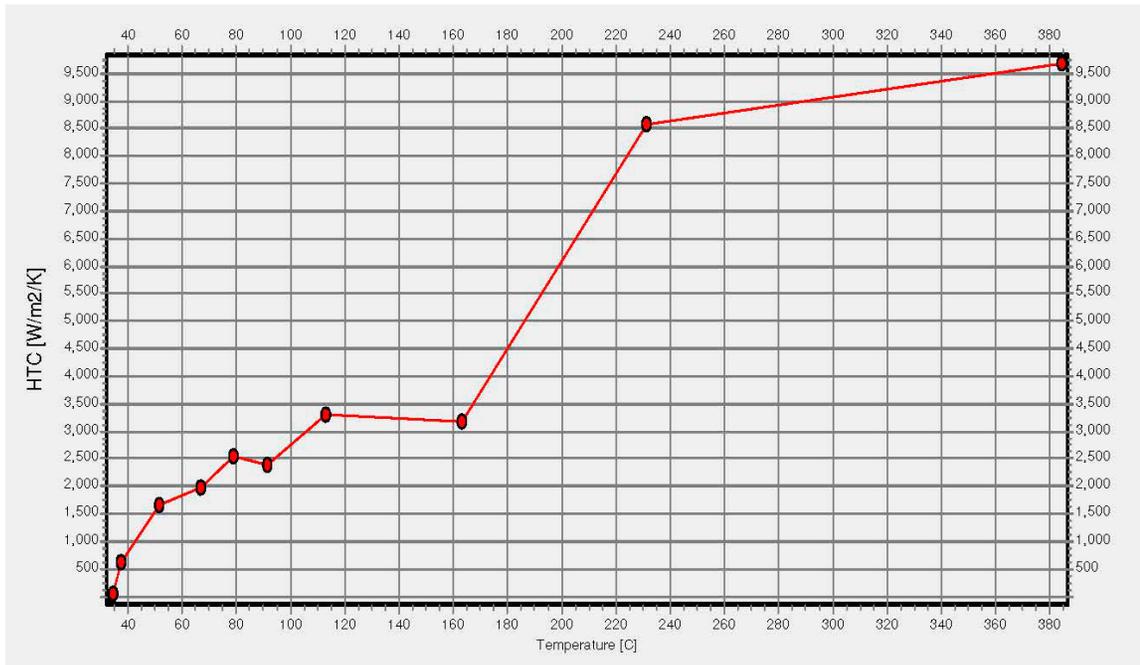


Figura 85. Curva de HTC vs T para la probeta 1001 a 1000 rpm

Cabe destacar que para este cálculo la probeta fue calibrada de acuerdo con el manual [7] pero es muy probable que por las restricciones en los valores de entrada de la iteración y el método numérico que esté utilizando el software estén ocurriendo estos problemas.

El siguiente reporte fue de la probeta 1002 la cual corresponde a 600 rpm de agitación. En esta Figura 86 si se puede observar que hubo un aumento en el registro de temperaturas, particularmente la iteración calculó de 650 grados hacia abajo, aunque no se pudieron registrar los valores de HTC de las temperaturas hasta los 850 grados.

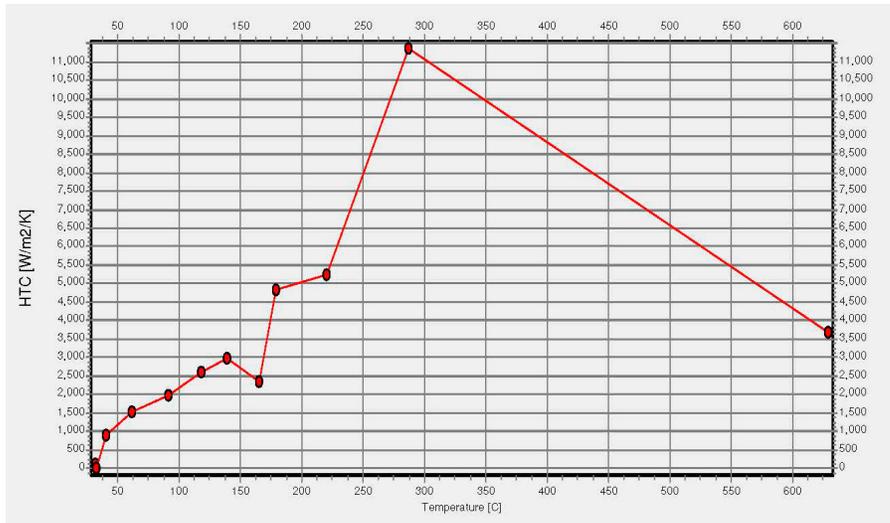


Figura 86. Curva de HTC vs T para la probeta 1002 a 600 rpm

La Figura 87 representa la estimación con la probeta 1009 correspondiente a 200 rpm. En esta se puede observar que se capturaron los efectos del enfriamiento a partir de la temperatura de 770 grados hasta la temperatura ambiente. Los reportes de las restantes probetas tuvieron comportamientos parecidos por lo que no se explicaron, pero se pueden encontrar en el APENDICE I. En general se puede decir que los resultados de los experimentos estuvieron rondando los 10500 W/m²K para los valores de HTC.

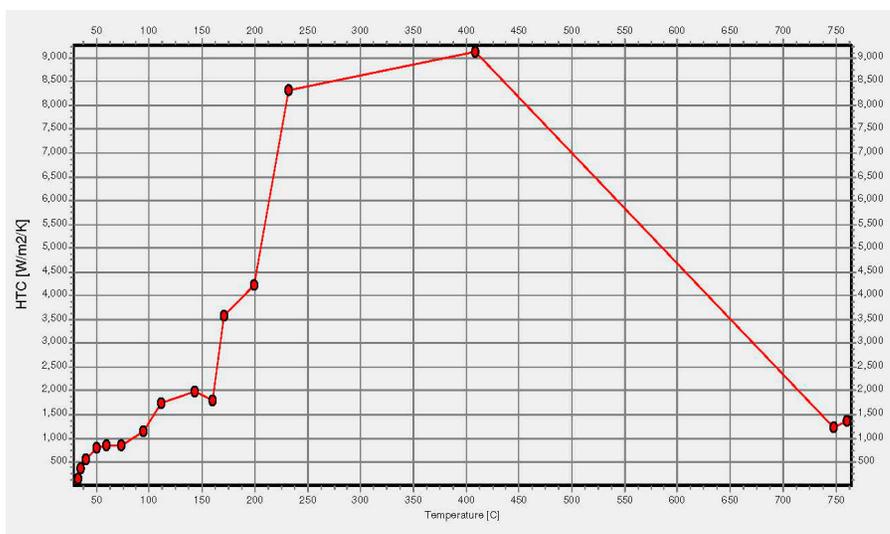


Figura 87. Curva de HTC vs T para la probeta 1009 a 200 rpm

DISCUSION

1. VELOCIMETRIA DE IMÁGENES DE PARTICULAS (PIV)

Como parte de la discusión, en la técnica de PIV hubo mucho resultado que analizar, que discriminar, convenios a tomar y criterios por definir para finalmente obtener toda la información concerniente al movimiento del fluido en el Quenchtotest. En este apartado se hicieron comparaciones entre los cortes verticales y los horizontales para ver si en la línea de intersección los valores de U y V coincidían y que porcentaje de error presentan.

1.1 COMPARACION ENTRE LAS IMÁGENES DE VECTORES EXPORTADAS POR DYNAMICS STUDIO® 2015 Y LAS OBTENIDAS POR SIMULACIÓN NUMÉRICA EN MATLAB®

Si observamos la Figura 88 podemos observar una imagen saturada de vectores los cuales tienen un tamaño no controlado y no permiten llevarse una buena idea

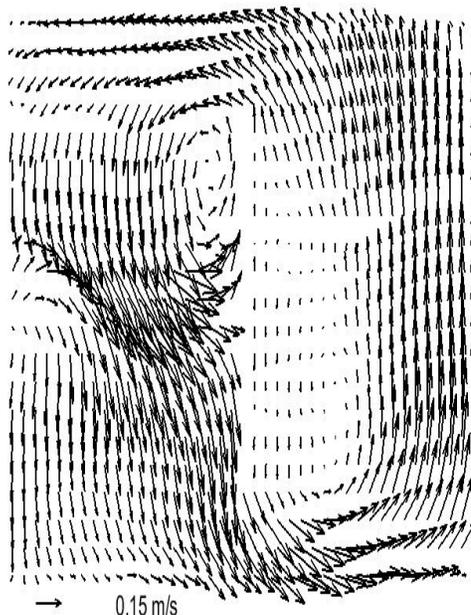


Figura 88. DER 10 MM 600 rpm obtenida por MATLAB®

del comportamiento del fluido en ciertas zonas de recirculación como a la derecha de la propela. Sin embargo, si observamos la Figura 89, en esta se puede ver una imagen más nítida que la anterior e incluso con su propia escala de colores la cual permite identificar perfectamente las zonas de turbulencia debido a la propela.

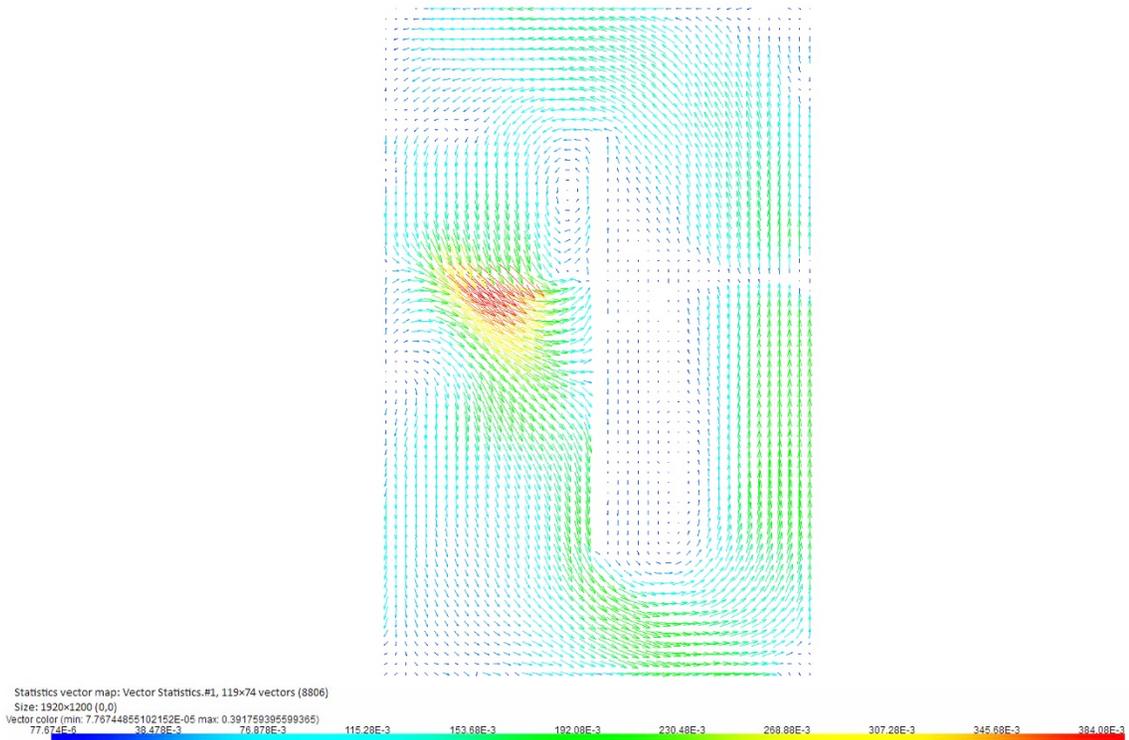


Figura 89. DER 10 MM 600 rpm obtenida por DYNAMICS STUDIO® 2015

También se puede observar muy bien la zona de la derecha donde no hay información del fluido pues como el láser incidió sobre la propela en primera instancia esta proyectó una leve sombra (Figura 131) hacia esta parte del tanque. Por lo anterior se puede decir que las imágenes de vectores que se exportan a través del DYNAMICS STUDIO® 2015 son las que se usaron para estudiar el comportamiento del fluido en el Quenchtotest.

1.2 COMPARACION DE VELOCIDADES EN LAS INTERSECCIONES DE LOS CORTES

Debido a la necesidad de validar la técnica PIV y como se le hicieron varios cortes (Figura 5) al experimento para caracterizar el flujo de fluidos, se hizo necesario realizar una comparación de velocidades y la determinación del error en la línea de intersección de los cortes horizontales con los verticales.

Es lógico entender que para que la dirección y sentido de las componentes de la velocidad pudieran coincidir verdaderamente, las hojas de vectores obtenidas tuvieron que ser giradas matemáticamente a través de multiplicaciones por -1 y demás operaciones avanzadas en Excel, pues es la única forma de que a cada valor de una posición le corresponde la misma dirección y sentido de la otra. La necesidad de esto surgió debido a que cuando se gira el experimento para tomar las imágenes de los distintos cortes y optimizar la incidencia del láser, los valores a ser exportados estaban en un sistema de coordenadas rotado localmente, no siendo así con el comportamiento del fluido el cual es único.

El resultado de esto fue la obtención de una serie de gráficos de dispersión X Y como se observa en la Figura 90.

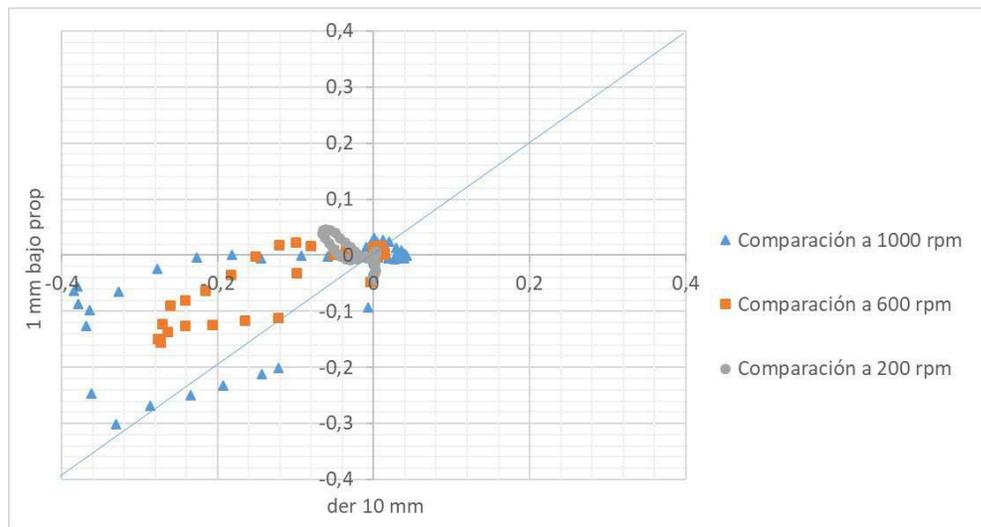


Figura 90. Correlaciones de las velocidades entre el corte PROPELA 1 MM BAJO y DER 10 MM a las 3 velocidades de agitación.

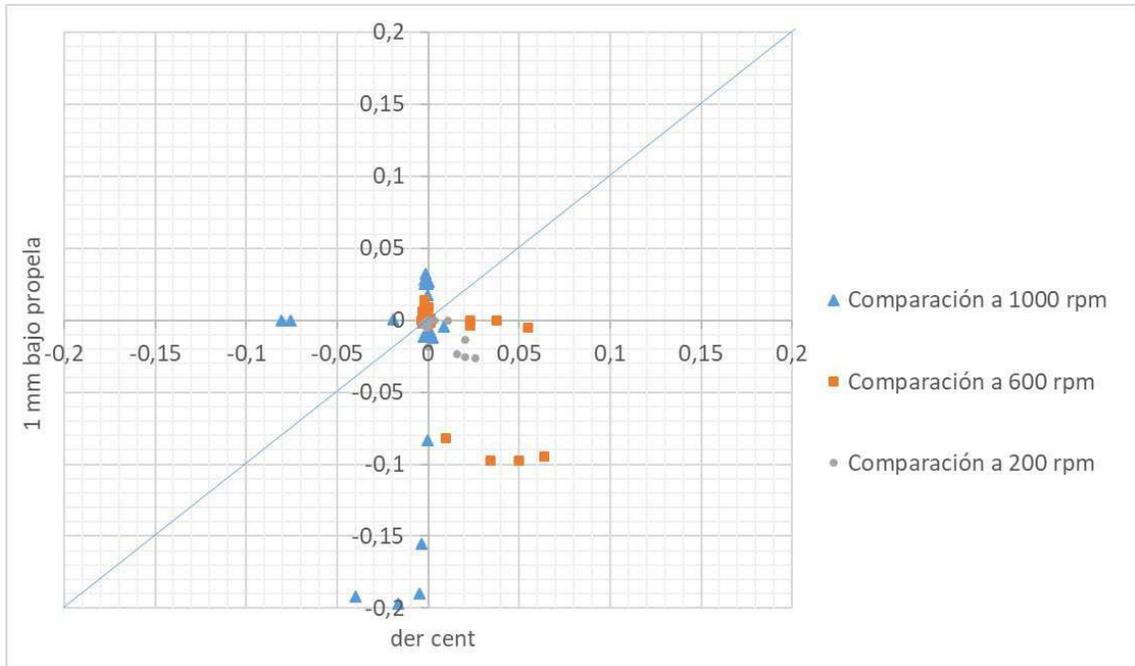


Figura 91. Correlaciones de las velocidades entre el corte PROPELA 1 MM BAJO y DER CENT a las 3 velocidades de agitación

El hecho de que los valores de PROPELA 1 MM BAJO estén más bajos que DER 10 MM en su línea de intersección nos dice que hubo cierta susceptibilidad en la obtención de los valores de forma horizontal.

Los gráficos anteriores de la Figura 90 y Figura 91 dan un idea de cuan real es la técnica cuando se cambia el plano de corte de un sentido a otro (de horizontal a vertical) y su explicación está en que cuando se hace una medición en un plano específico, hay variables como la distancia del experimento al láser, la distancia del experimento a la cámara de alta velocidad, la tasa de obtención de las imágenes, el paralelismo entre la cámara y el experimento, que se deben controlar lo mejor posible pues provocan un error en la estimación y discretización que hace el software para solucionar el problema. También influye el método estadístico que utiliza el software para validar los picos de probabilidad de que un vector sea realmente el que se desplazó y demás.

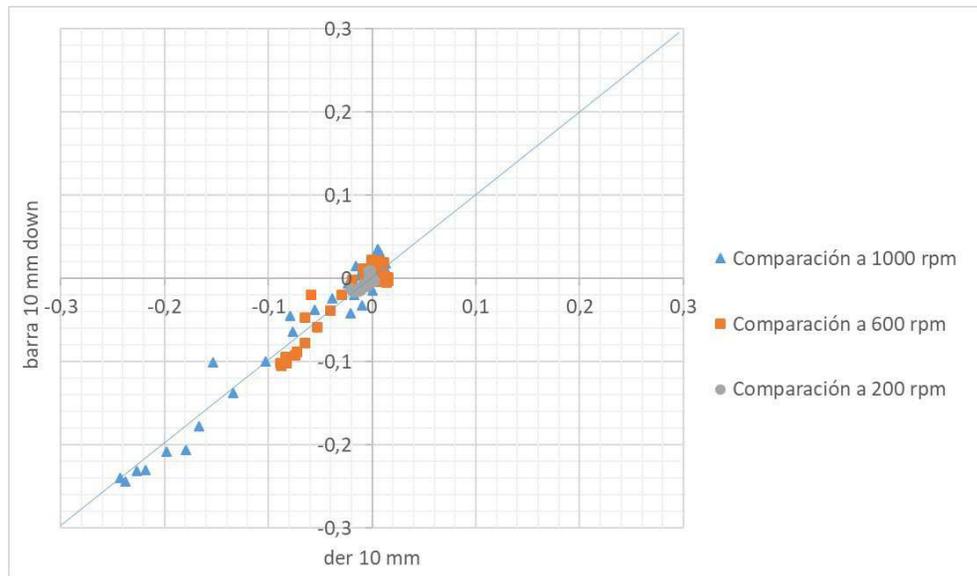


Figura 92. Correlaciones de las velocidades entre el corte BARRA 10 MM BAJO y DER 10 MM a las 3 velocidades de agitación.

En la figura anterior se puede observar una mejor correlación entre ambas velocidades en su línea de intersección al igual que en la Figura 93 y Figura 94, por lo que se puede inferir que al ir disminuyendo en altura desde la propela las correlaciones de los cortes horizontales con los verticales fue mejorando.

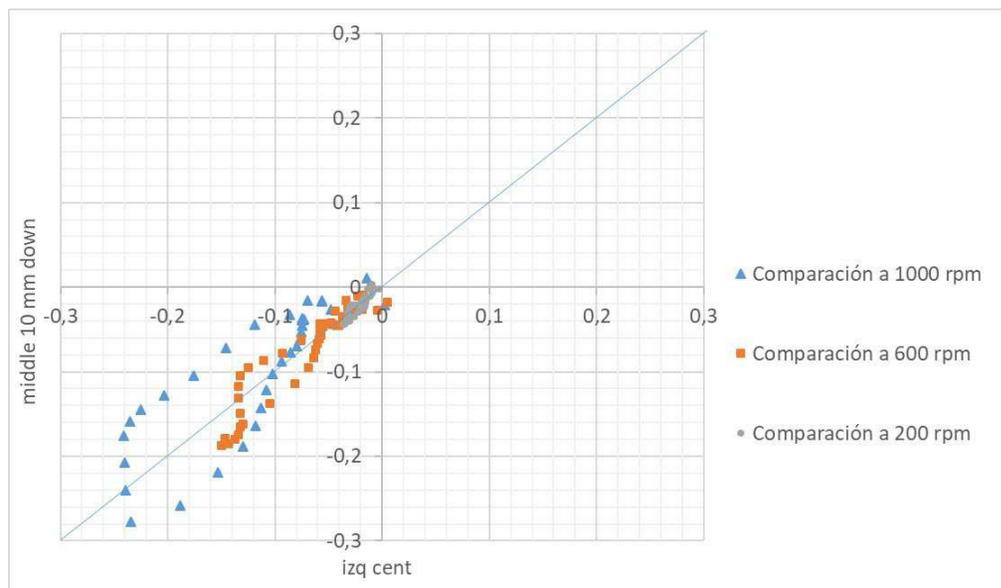


Figura 93. Correlaciones de las velocidades entre el corte MEDIO 10 MM BAJO e IZQ CENT a las 3 velocidades de agitación.

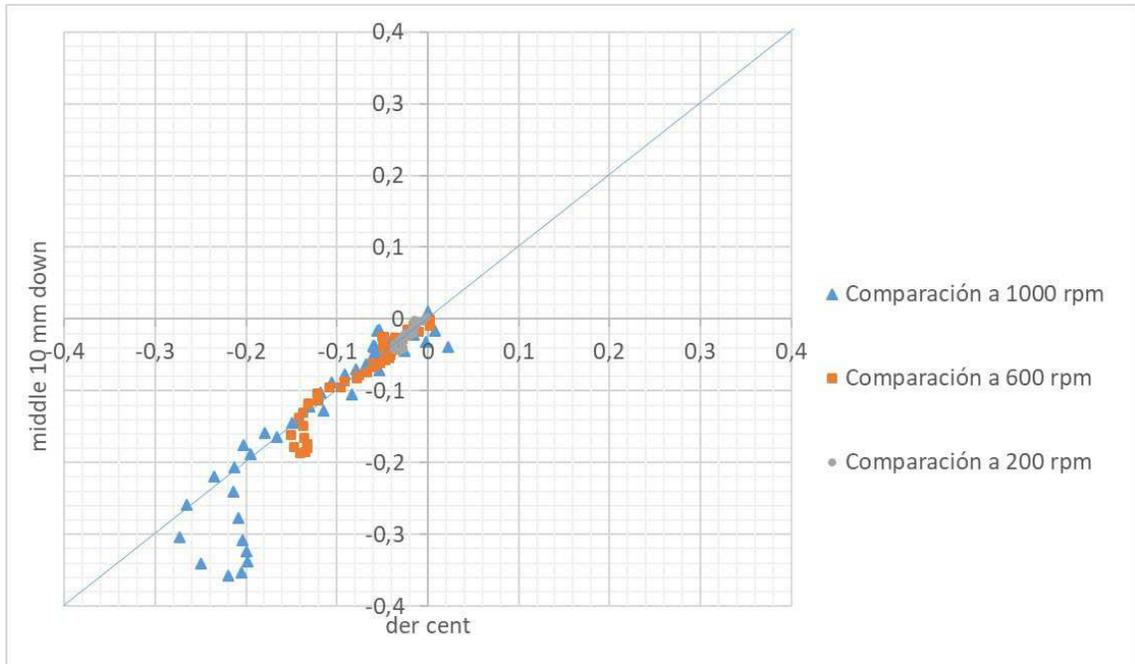


Figura 94. Correlaciones de las velocidades entre el corte MEDIO 10 MM BAJO y DER CENT a las 3 velocidades de agitación

Lo anterior se puede justificar debido a que en las hojas de resultados *.csv el ΔX y ΔY no se mantienen constante si cambias el corte, donde si se mantiene constante es en la misma hoja. Esto provoca que los mismos cortes no se intersecten exactamente en el mismo lugar pues hay un valor bajo de milímetros de diferencia en la coincidencia. Luego, se puede decir que cada experimento PIV que se realice es independiente de cualquier otro y si se le cambia cualquier variable, de hecho, si se realiza nuevamente el mismo experimento con las mismas condiciones se espera que sea reproducible con cierta precisión. Por lo que en dependencia de lo exacto que el usuario quiera que sea su experimento decidirá si usar esta técnica para obtener una caracterización del flujo de fluido u otra parecida.

Debido a las correlaciones anteriores se hizo necesario conocer el error de estimación entre una técnica u otra. Para llevar a cabo esto se tiene que entender primeramente que las correlaciones anteriores fueron realizadas bajo la base de que en la línea de intersección de los cortes la componente de velocidad u de un corte no era la misma en el otro corte sino v , por el hecho de rotar el experimento

y cambiarlo de plano vertical a horizontal. Entonces al revisar bien que componente es la que coincide con la otra se tomó el convenio de que la u de los cortes verticales es la v de los cortes horizontales y de esa forma se extrajeron los datos de los archivos *.csv.

Habiendo dicho lo anterior el error entre una medición y la otra se puede observar en la Figura 95 que el error es por debajo de 500% en casi toda la longitud salvo en algunas muy puntuales donde llega a 1000%.

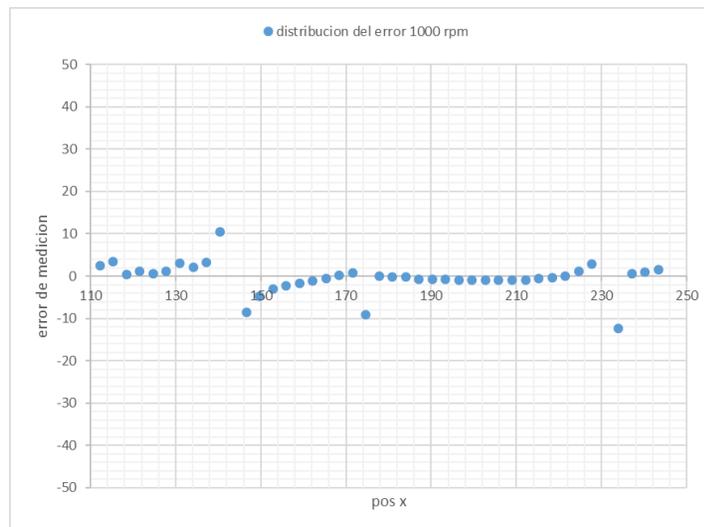


Figura 95. Errores de medición en la intersección de los cortes DER 10 MM y BARRA 10 MM BAJO para 1000 rpm.

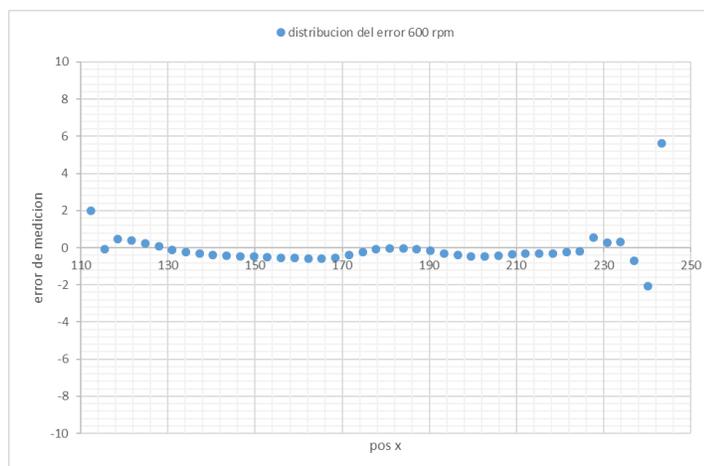


Figura 96. Errores de medición en la intersección de los cortes DER 10 MM y MEDIO 10 MM BAJO para 600 rpm.

En la Figura 96 se puede observar como el error está por debajo del 100% en toda la longitud salvo una medición al inicio que está a 200% de error y otra a 600% al final. Todo esto tiene la justificación de que son dos técnicas completamente diferentes ya que una es un método experimental y la otra es un programa computacional de simulación, lo que nos lleva a pensar que son completamente compatibles si analizamos que estamos tratando con velocidades de los órdenes de 10^{-2} m/s.

Finalmente se puede decir que, salvo el hecho de encontrarnos estos errores altos en número, pero aceptables completamente por el orden de magnitud del que se trata, se puede decir que la técnica es completamente certera para los propósitos que fue creada.

2. PIV VS FLUENT

2.1 COMPARACION ENTRE CONTORNOS DE VELOCIDAD DE MATLAB Y FLUENT

Comparando los resultados gráficos obtenidos por simulación numérica con MATLAB® y FLUENT® se puede decir que los mismos son bastante certeros. Lo único reprochable a esta comparación es el hecho de que los contornos obtenidos por MATLAB fueron hechos con un código básico que contempla lo necesario para su obtención, a diferencia de los obtenidos por FLUENT, esto se puede observar en las figuras siguientes.

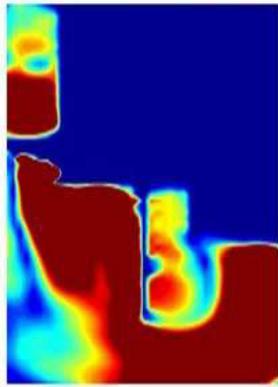


Figura 97. DER CENT a 1000 rpm (MATLAB®)

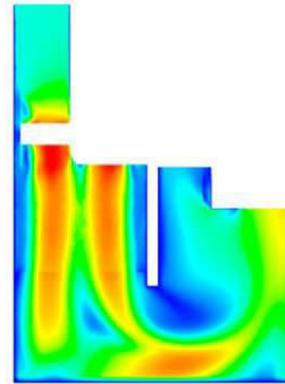


Figura 98. DER CENT a 1000 rpm (FLUENT®)

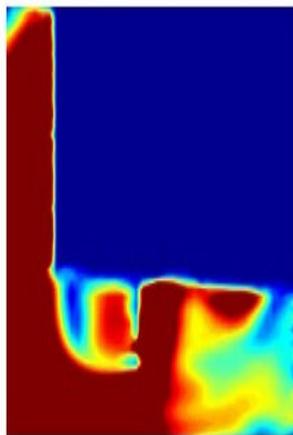


Figura 99. IZQ CENT a 1000 rpm (MATLAB®)

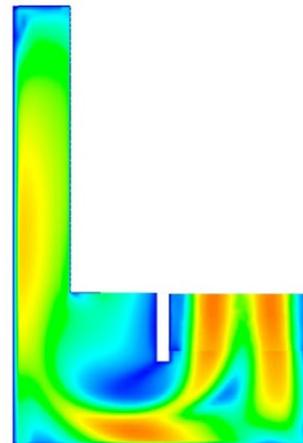


Figura 100. IZQ CENT a 1000 rpm (FLUENT®)

2.1 COMPARACION ENTRE IMÁGENES DE VECTORES DE PIV Y FLUENT

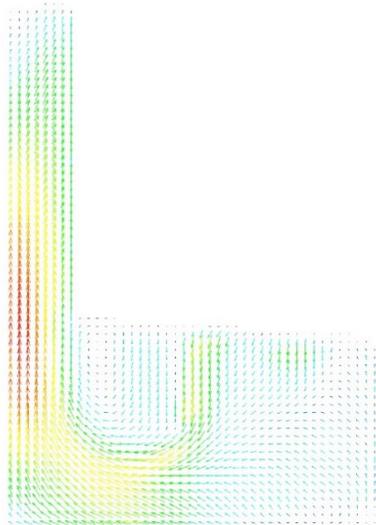


Figura 101. IZQ CENT a 1000 rpm (PIV)

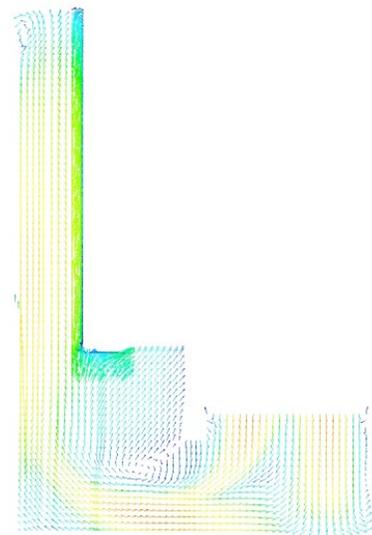


Figura 102. IZQ CENT a 1000 rpm (FLUENT®)

En las imágenes anteriores se pueden observar las imágenes de vectores obtenidas con la técnica PIV y la obtenida con el FLUENT® donde la principal diferencia la aporta el hecho de que el FLUENT® al tener que simular la rotación de la propela y a partir de ahí calcular el movimiento del fluido provocado por esta, presenta ciertas incongruencias lógicas por la complejidad del modelo como esa zona amarilla de la derecha la cual va directo hacia el fondo del tanque.

2.2 ERRORES DE MEDICION ENTRE PIV Y FLUENT EN LAS LINEAS DE INTERSECCION DE LOS CORTES

En la Figura 103 se puede observar el error de medición entre FLUENT y PIV para el cual podemos decir que ambos no llegan al 10% por lo cual son bastante aceptadas ambas técnicas.

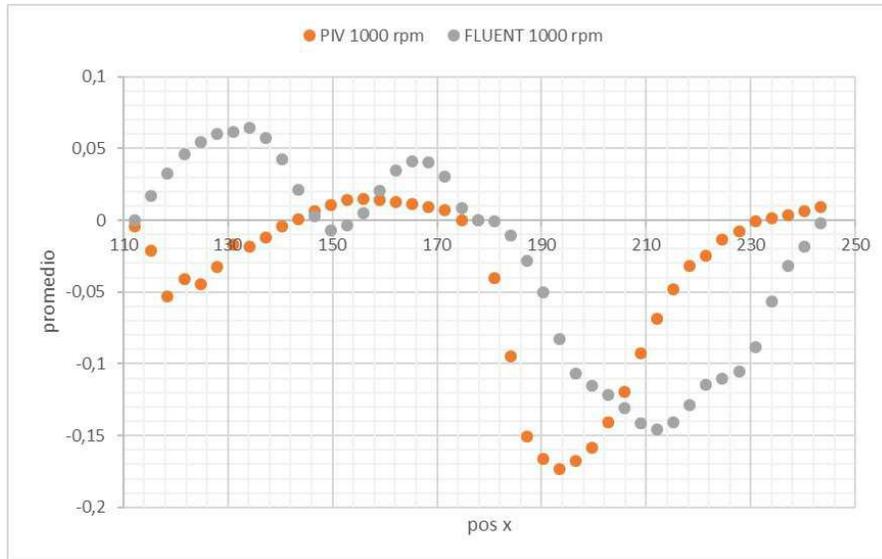


Figura 103. Errores de medición en la intersección de los cortes DER 10 MM y BARRA 10 MM BAJO para 1000 rpm.

En la Figura 104 se puede observar que los errores no pasaron del 2% sin embargo a lo largo de todo el eje x la medición de FLUENT solo llego a la mitad pues como se simulan las 2 zonas por separado hay que exportar los resultados de cada zona y luego unirlos como en la figura anterior.

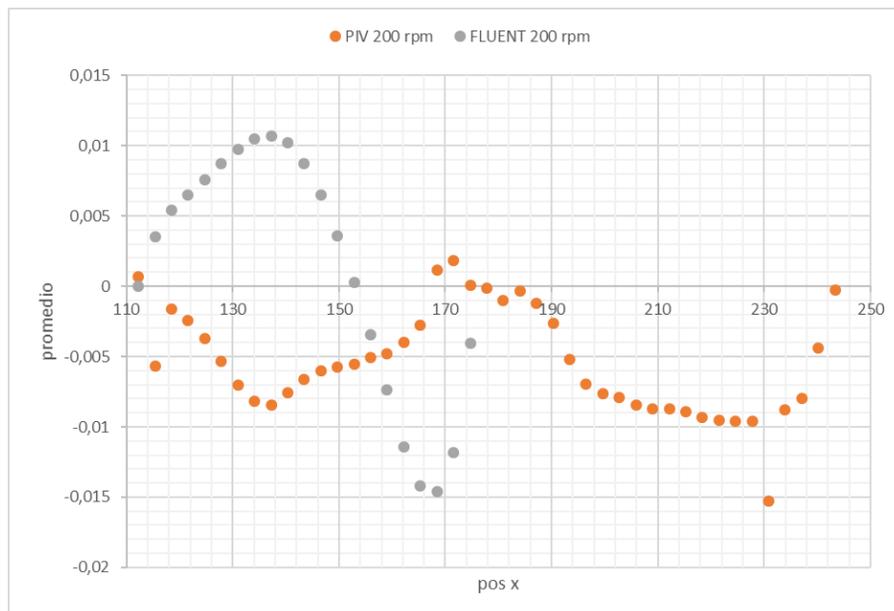


Figura 104. Errores de medición en la intersección de los cortes IZQ CENT y MEDIO 10 MM SOBRE para 200 rpm.

3. FLUENT

2.1 LÍNEAS DE ANÁLISIS

Como los valores de separación entre puntos de mediciones de FLUENT y PIV son diferentes se hicieron mediciones de acuerdo a la separación de PIV. Esto quiere decir que se contaron la cantidad de mediciones que se obtuvieron de la técnica PIV en los archivos *.csv, provocado por el ΔX y ΔY , y a lo largo de las líneas de análisis (Figura 24) se discretizó al mismo número de cortes en FLUENT. Fue imposible adecuar estas separaciones en FLUENT pues esto implicaba limitar la malla a un tamaño de elemento fijo con los correspondientes problemas de convergencia que esto provocó.

Como se puede observar en la Figura 105, el error de medición de las componentes de velocidad entre FLUENT y PIV para esa línea de análisis es alto. Casi en toda su longitud las diferencias son de hasta el 100%, lo que causaría duda sobre la aplicación de un método u otro, pero si tenemos en cuenta que se habla de valores en el orden de 10^{-3} son perfectamente entendibles los valores. Si se analiza la parte derecha de la barra (Figura 106), esta corresponde a la zona donde el fluido esta entre la barra y la división media del Quenchtotest. En esta zona, si observamos la Figura 173 hay una pequeña recirculación cuando el fluido toca la parte inferior de la barra por lo que estamos en un lugar donde los métodos

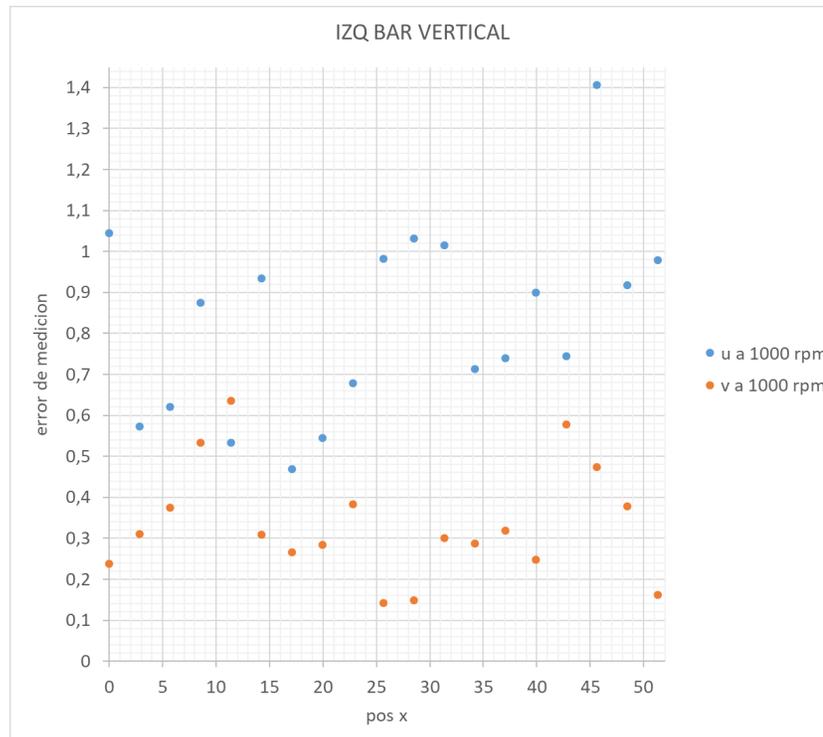


Figura 105. Errores de medición de las componentes de velocidad entre FLUENT y PIV para la línea de análisis IZQ BAR VERTICAL

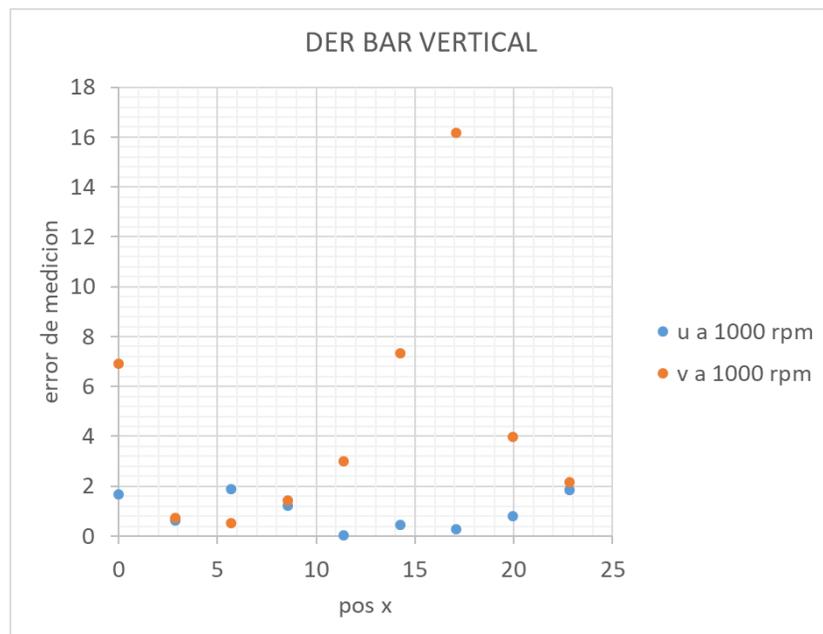


Figura 106. Errores de medición de las componentes de velocidad entre FLUENT y PIV para la línea de análisis DER BAR VERTICAL

matemáticos tienen el mayor porcentaje de error por la naturaleza del fenómeno físico sumado a que el fluido no entra con tanta velocidad a esta zona como a la de la izquierda de la barra.

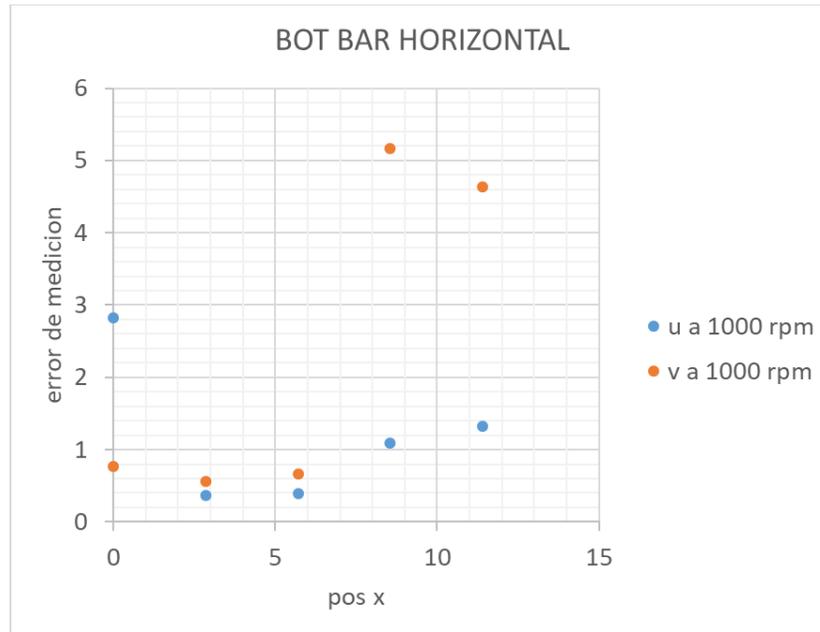


Figura 107. Errores de medición de las componentes de velocidad entre FLUENT y PIV para la línea de análisis BOT BAR HORIZONTAL

Haciendo un análisis parecido al anterior, en la Figura 107 se observa que en el fondo de la barra que es donde el fluido toca a la barra con toda su velocidad hay errores de medición de hasta un 500% para la velocidad vertical en la mitad de la barra, lo cual es completamente entendible. Siendo estos valores de 0.0463 y 0.0231 para PIV y FLUENT respectivamente, se acepta que este tipo de errores sucedan sin quitarle algún tipo de veracidad a ninguno de los 2 métodos.

Habiendo analizado la influencia del perfil de presiones de la propela en la velocidad del fluido, el lugar donde está el termopar con puntos en los 360 grados y la distribución de velocidades en 3 líneas en zonas cercanas a la barra, se puede concluir que la aplicación de ambos métodos fue más que precisa para propósitos de caracterización del flujo de fluidos en el experimento donde las mediciones de velocidades a través de FLUENT validaron con alta precisión las llevadas a cabo por la técnica PIV.

2.2 PUNTOS DE ANALISIS

Los puntos de análisis definidos según la Figura 23, los cuales hacen referencia a la zona donde el termopar va colocado, fueron comparados para todas las velocidades de agitación arrojando los porcentajes de error que se muestran en la Figura 108, Figura 109 y Figura 110. Si tenemos en cuenta que esta es la zona donde más velocidad v hay en el lado izquierdo de la barra y más u en el lado derecho, se puede decir que los valores del error no son tan descabellados.

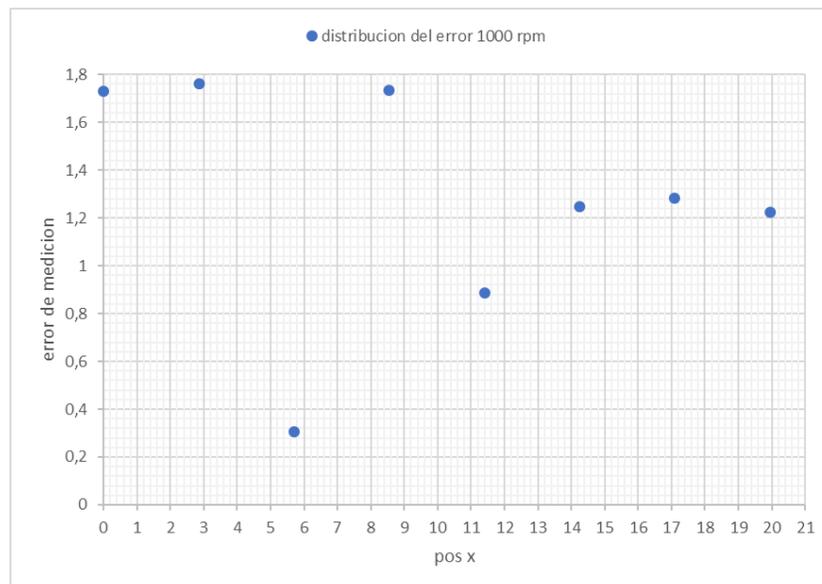


Figura 108. Distribución del error en los puntos de análisis para 1000 rpm

También cabe destacar que el plano horizontal donde está el termopar, corresponde a una altura considerable para el experimento PIV pues como el espejo en este caso va por debajo del experimento hay una buena cantidad de agua entre el plano iluminado por el láser y la cámara, y puede resultar en una pérdida de velocidad.

A pesar de lo antes mencionado los valores se consideran aceptables y ambas técnicas válidas para esta zona, arrojando valores rondando el promedio de 0.0112, 0.0544 y 0.1155 para 200, 600 y 1000 rpm respectivamente.

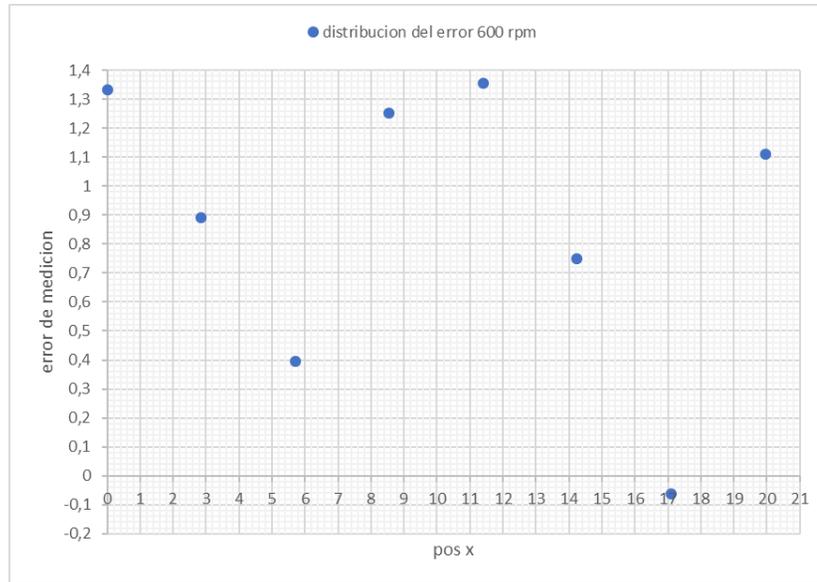


Figura 109. Distribución del error en los puntos de análisis para 600 rpm

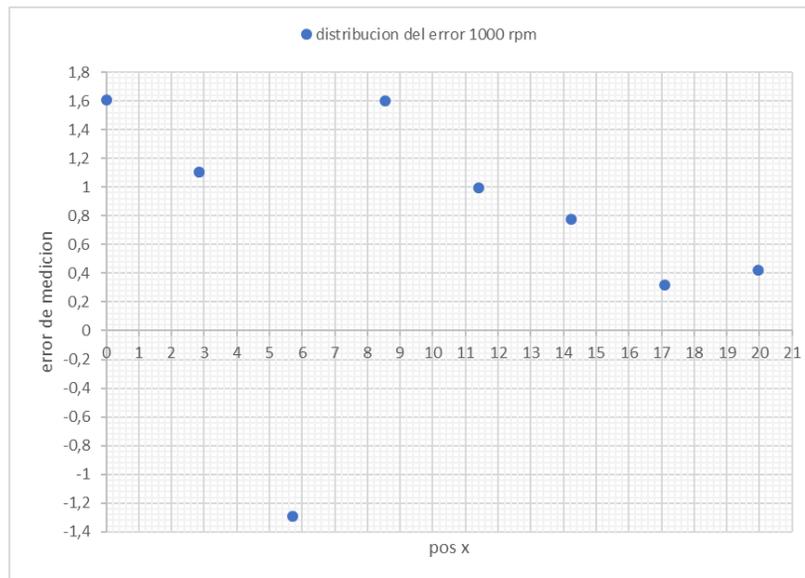


Figura 110. Distribución del error en los puntos de análisis para 200 rpm

2.3 COMPORTAMIENTO DEL FLUIDO EN LA VECINDAD DE LA PROBETA

El comportamiento del fluido en la zona cercana de la probeta se puede observar en la Figura 111. En la cual podemos observar la heterogeneidad en el enfriamiento que causa el choque directo contra la superficie plana de la probeta, causando recirculación y demás perturbaciones al fluido.

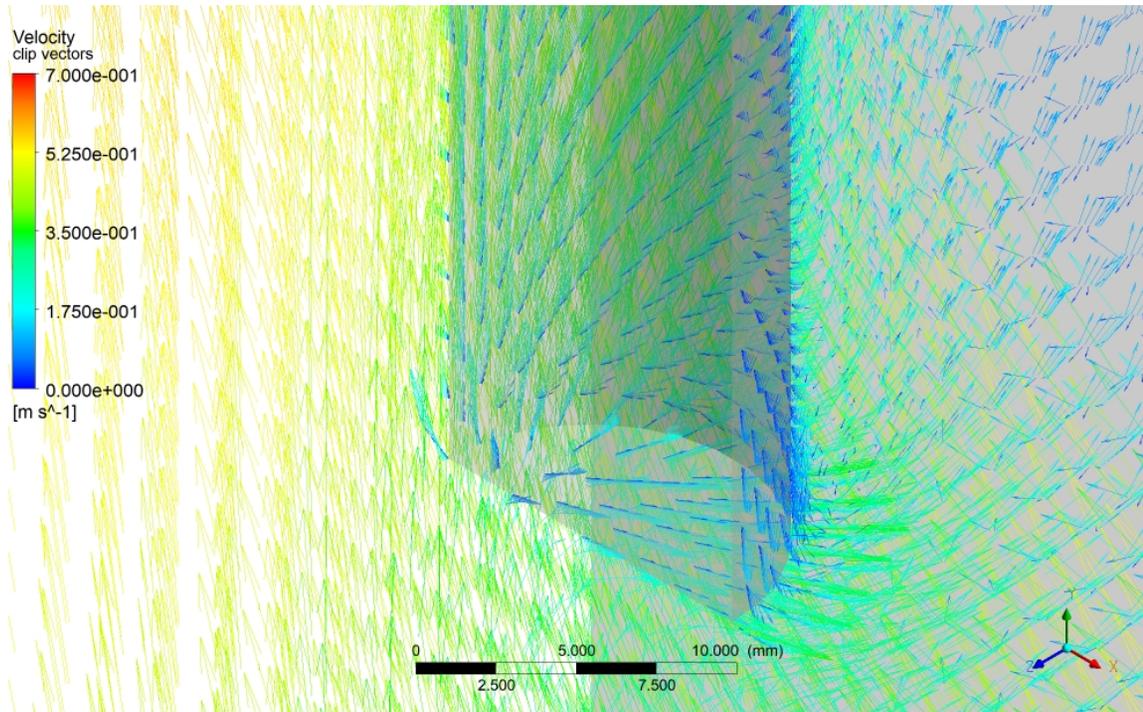


Figura 111. Comportamiento del fluido en la vecindad de la probeta

También se puede observar en la Figura 112 y Figura 113, un corte horizontal y vertical de la zona de la probeta, donde se detalla de forma bidimensional la trayectoria del agua en el experimento. Aquí se pueden verificar las zonas de mayor verticalidad del flujo y también se ve como el movimiento circular en el plano horizontal es descrito por los vectores debido al movimiento inicial de la propela.

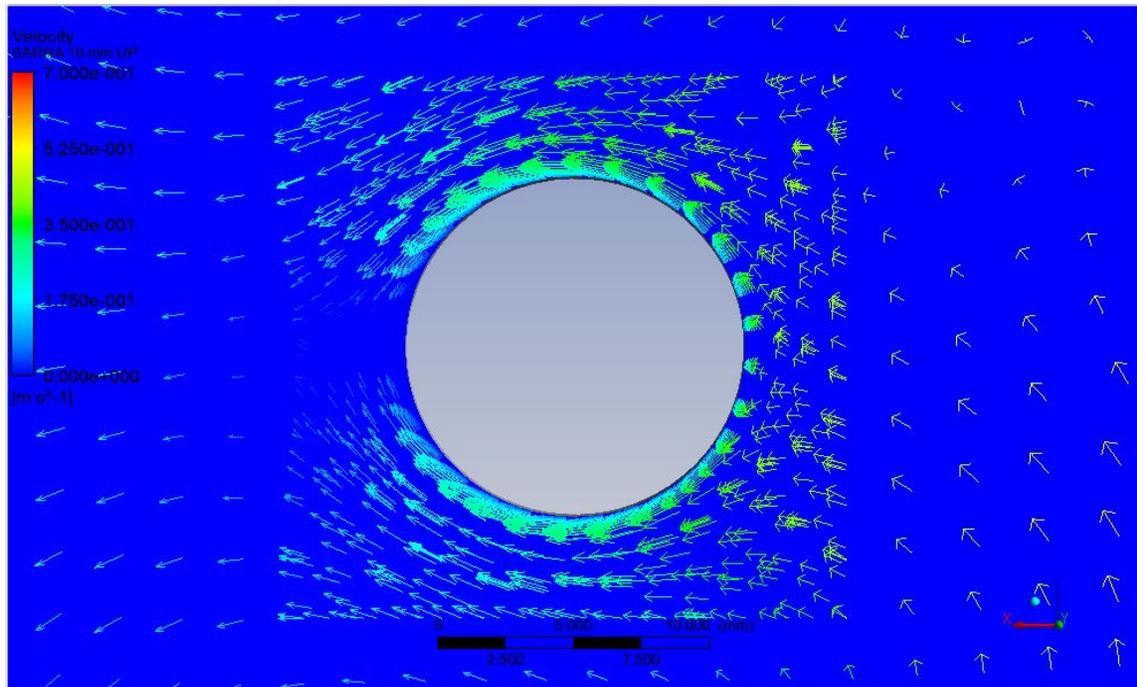


Figura 112. Vectores en zona de termopar 1000 rpm. Corte horizontal.

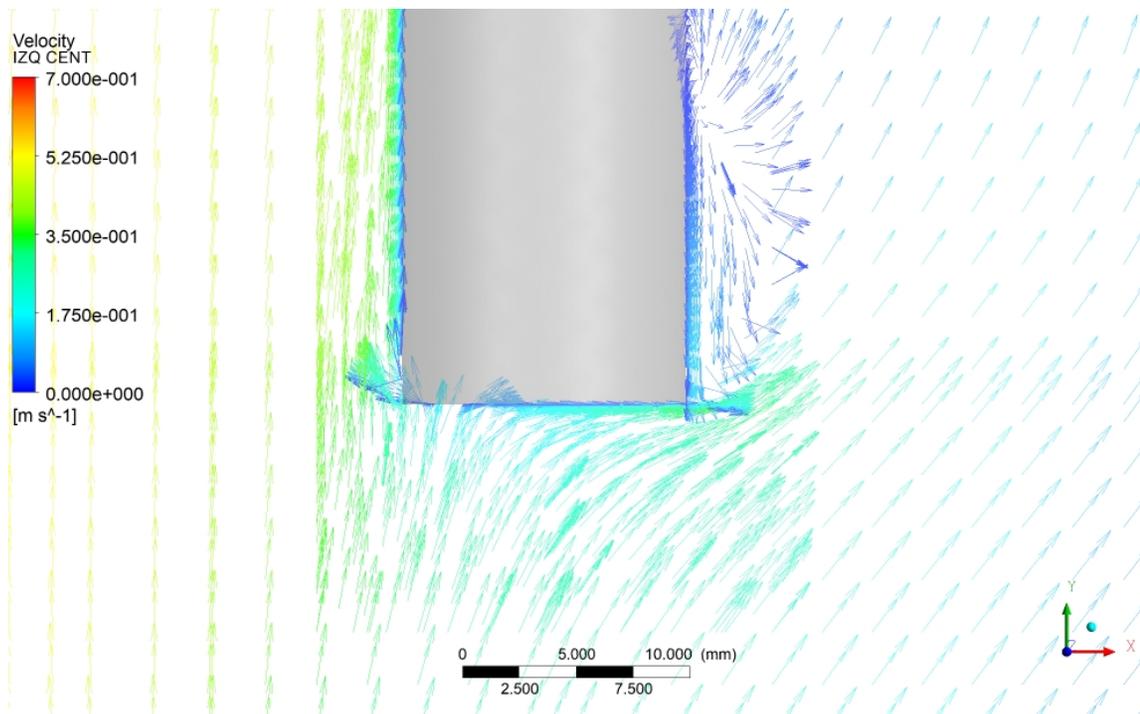


Figura 113. Vectores en zona de termopar 1000 rpm. Corte Vertical.

4. RESULTADOS DEL QUENCHOTEST

3.1 CURVAS DE ENFRIAMIENTO Y RAZON DE ENFRIAMIENTO

Como era de esperar cada curva arrojó valores de razón de enfriamiento de acuerdo con su velocidad de agitación para la primera corrida de experimentos (Figura 82) lo que significa que la mayor razón de enfriamiento la produjo la probeta 1001 y la menor fue de la probeta 1003.

Debido al descuido provocado por la demora en llevar la probeta del horno al tanque rápidamente (Figura 83), esta se enfrió superficialmente más lento de lo normal e incluso hizo que la razón de enfriamiento que calcula el software fuera superior al de la probeta de 600 grados representada por el color azul. Las probetas 1004 y 1005 no tuvieron comportamientos extraños. Aquí se observan razones de enfriamiento de 233.12, 221.24 y 227.5 °C/s a temperaturas de 629.37, 636.37 y 606.04 °C respectivamente para las tres probetas en orden creciente.

Por lo anteriormente demostrado, podemos concluir que para que los valores finales de nuestro experimento estén correctos, necesitamos tener mucho cuidado con los detalles pues el mínimo desliz en el transporte de la probeta al horno puede invalidarnos todo un ensayo. Es muy recomendable si no casi imperativo, el realizar varios experimentos para tener una idea de si el nuestro es replicable o no.

En la Figura 114 se pueden observar las curvas de enfriamiento y razones de enfriamiento de las probetas que fueron sometidas a 1000 rpm (1001, 1004 y 1007), mostrando como todos tienen casi los mismos valores excepto la 1004, para la cual no se pudo graficar su máxima razón de enfriamiento pues cuando los valores de las curvas son exportados para ser utilizados por otro programa, se exportan temperaturas arbitrarias para las cuales no existe una regla, por lo que el valor máximo de razón de enfriamiento quedó dentro de 2 temperaturas cualquiera. Es por eso que a la hora de graficar nuevamente estas propiedades no se puede replicar con la exactitud con la que grafica el software.

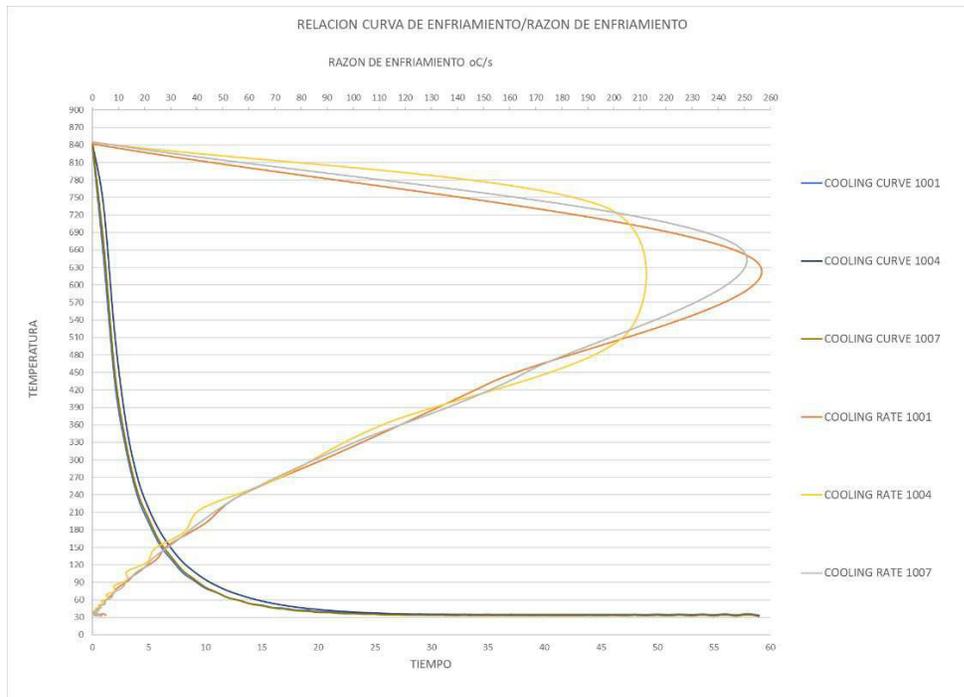


Figura 114. Comparación de curvas de enfriamiento y razones de enfriamiento para 1000 rpm

En la *Figura 115* sucede algo parecido pues la curva de la probeta 1008 para estar más pronunciada que las demás cuando en la realidad casi todas sobrepasan los 230 °C/s menos la 1005 cuyo valor es 221 °C/s. Todo esto provocado por la imposibilidad del programa para exportar razones de enfriamiento a voluntad.

La *Figura 116*, la cual suponía ser la gráfica más equilibrada debido al hecho de que sus 3 razones de enfriamiento son casi idénticas (228, 227 y 229), vuelve a demostrar que al software le faltan detalles de productividad pues nos obliga casi a tener que trabajar con él solamente.

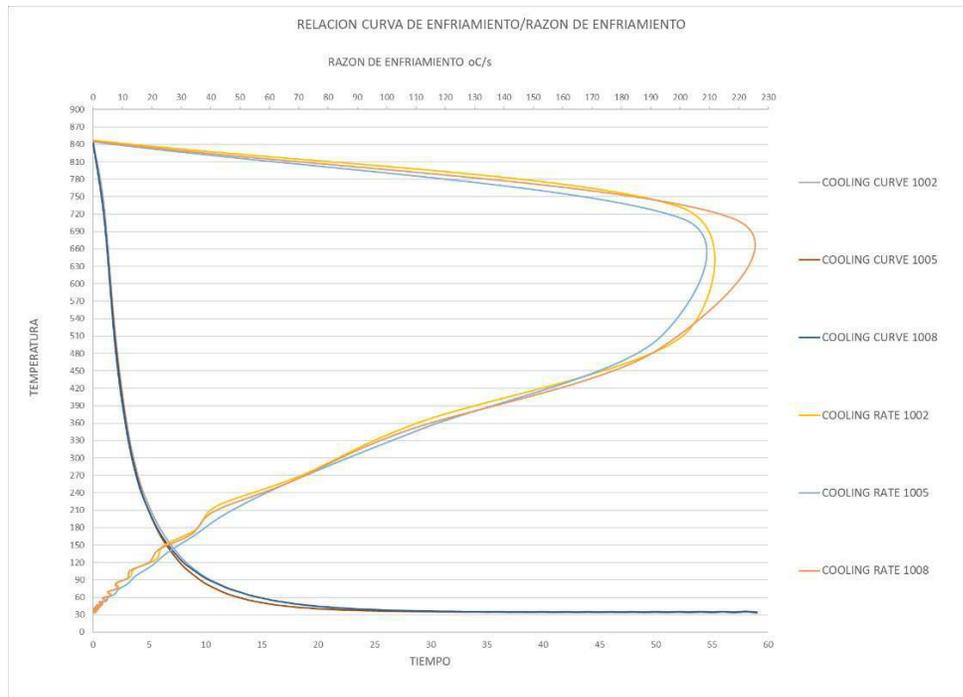


Figura 115. Comparación de curvas de enfriamiento y razones de enfriamiento para 600 rpm

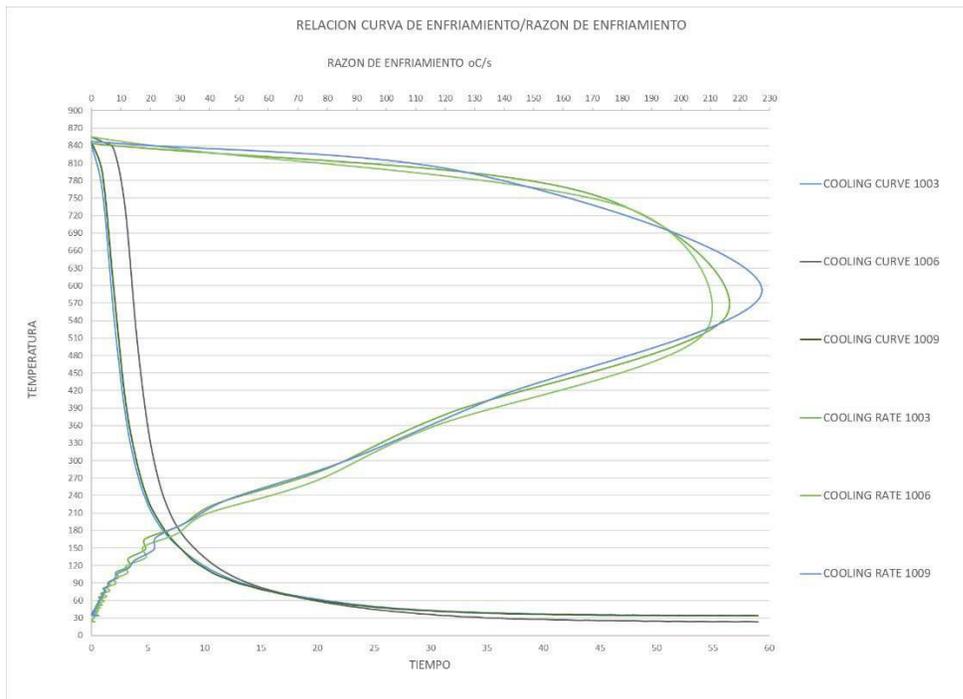


Figura 116. Comparación de curvas de enfriamiento y razones de enfriamiento para 200 rpm

3.2 ESTIMACION DEL HTC

Como este método de cálculo depende de los valores iniciales de HTC y de un Δt que define el usuario, el programa tuvo ciertos problemas en las iteraciones pues el mismo manual dice que si se establece un Δt muy pequeño hay errores de convergencia y si se establece un Δt muy grande es posible que no se recojan en los resultados los valores de HTC en las fases de vapor y ebullición nucleada, las cuales son las fases más importantes en el temple. Lo que sucedió en la estimación para la probeta 1001 fue que a ser muy estrictos en obtener resultados de estas fases la iteración fallaba y había que repetir nuevamente el cálculo e introducir un valor menos pequeño de Δt , no pudiéndose resolver así el valor de HTC para valores de temperatura altos.

La imagen que representa el cálculo de la probeta 1009 (Figura 87), a la cual se le pudo obtener información de la temperatura más alta por este método inverso de cálculo es el claro ejemplo de una estimación bien hecha si se conocen los límites de este software.

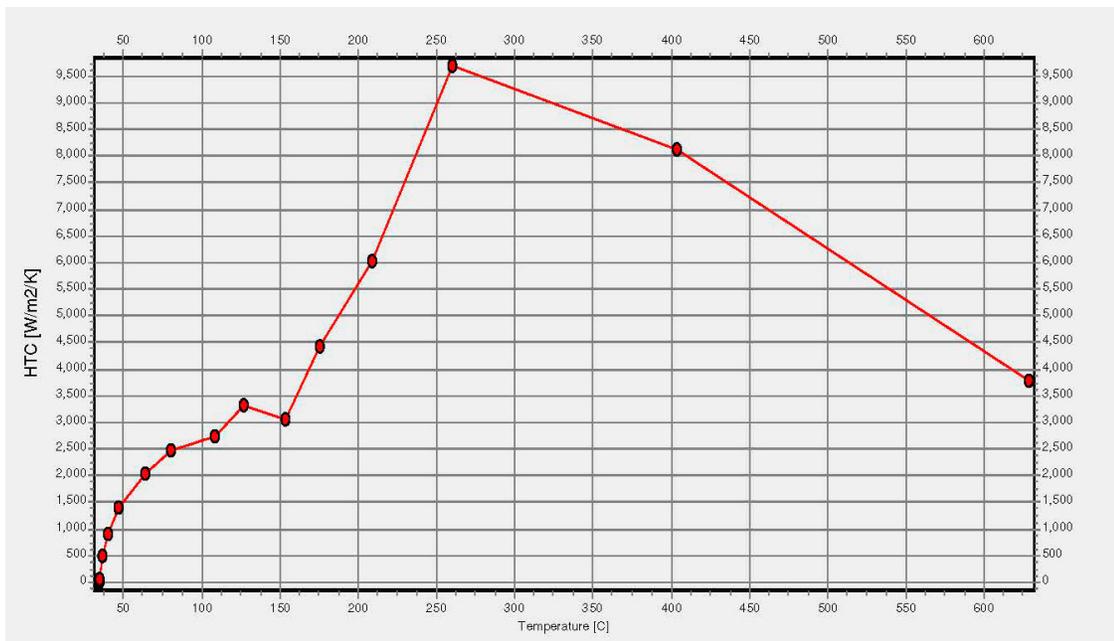


Figura 117. HTC vs T para la probeta 1005

Todas las imágenes de estimación de HTC, como se muestra en la Figura 117, presentan la unión de líneas en vez de una superficie curva como en las curvas de enfriamiento y razones de enfriamiento, debido a los pocos puntos de análisis que se pudieron establecer para evitar problemas de convergencia.

Las restantes imágenes muestran un comportamiento de las estimaciones de HTC muy similar a lo presentado en el capítulo de resultados, pues por encima de 770 grados no se pudieron obtener registros del HTC de ninguna probeta ensayada por problemas de convergencia, por lo que se comentó anteriormente que el software necesita ser ajustado y arreglado para futuras versiones.

Todo lo concerniente a los gráficos de estimación de HTC están en el APENDICE I.

3.3 RELACION ENTRE LA VELOCIDAD DE AGITACION Y HTC

Con el objetivo de obtener la relación entre la velocidad de agitación y el HTC en el Quenchttest, se utilizaron los valores de temperatura vs HTC exportados por el software, para así graficarlos en Microsoft Excel y realizarle modificaciones para un análisis más complejo.

El primer indicio de limitación surgió del hecho que al tener pocos puntos de análisis no se tiene una curva de HTC sino la unión recta de varios puntos como se explicó en el epígrafe anterior por lo que la comparación entre estas “curvas” que se intenta representar en la Figura 118 no tiene mucho sentido.

Como parte del cumplimiento del objetivo principal de esta investigación se obtuvo la Figura 119, en la cual se muestra la relación directa que existe entre los valores de HTC y la velocidad de agitación de la propela para varias temperaturas. Esto fue posible debido al uso de la interpolación numérica entre los valores que se exportaron del software en las hojas de cálculo de Microsoft Excel. De esta forma se puede tener una idea de cuál es el valor del HTC para una velocidad determinada en la zona del termopar que tiene la barra.

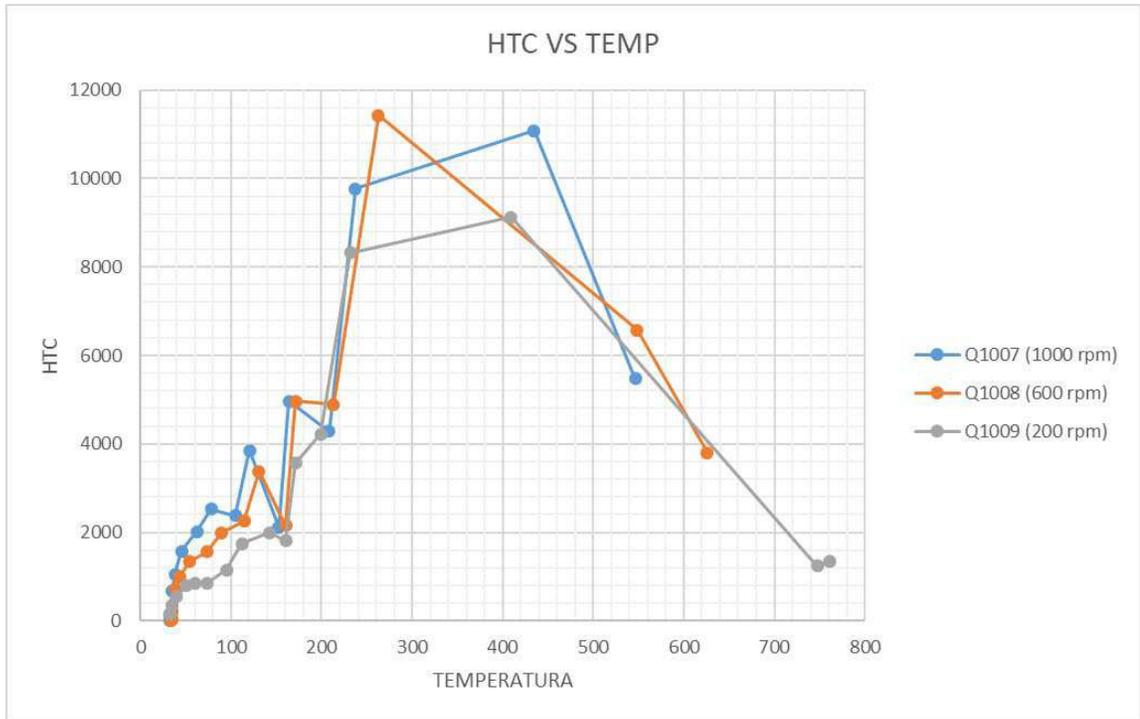


Figura 118. HTC vs T para el último set de experimentos

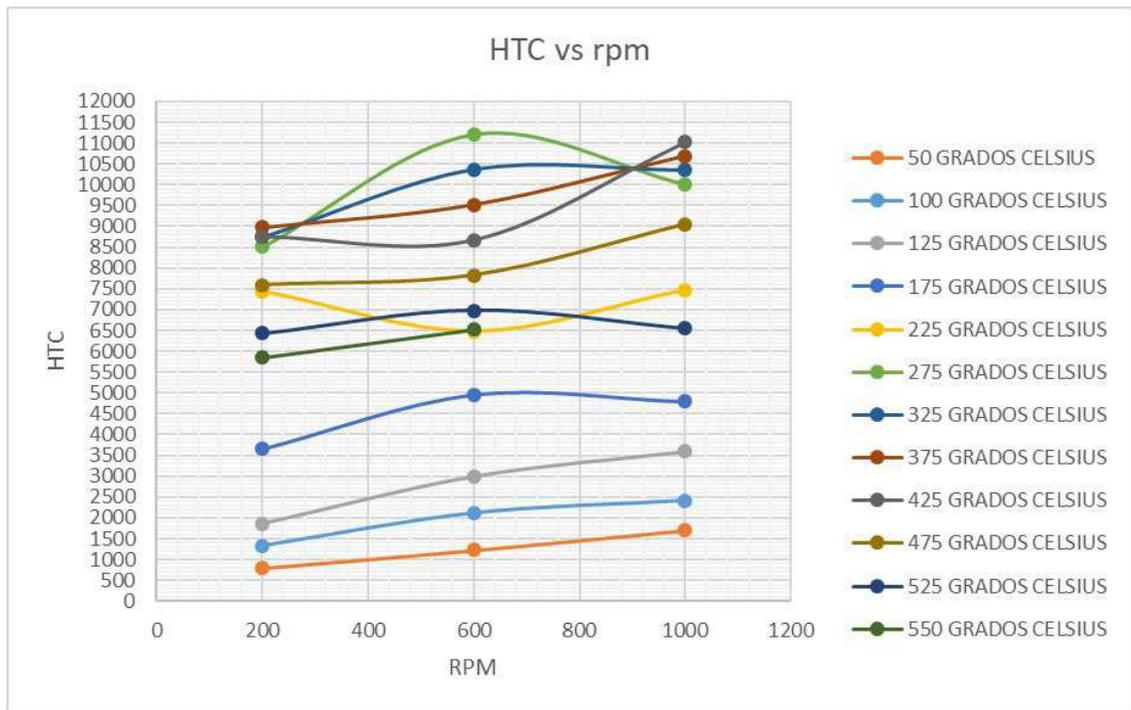


Figura 119. HTC vs rpm

En función de los resultados obtenidos por FLUENT y PIV en los puntos de análisis, se obtuvo la relación entre la velocidad de agitación y la velocidad resultante en la zona del termopar usando los valores RMS de las velocidades obtenidas. La relación polinómica entre estas 2 variables se muestra en la figura siguiente con un ajuste de 1 debido casi seguramente por los pocos datos de velocidades de agitación experimentalmente analizados.

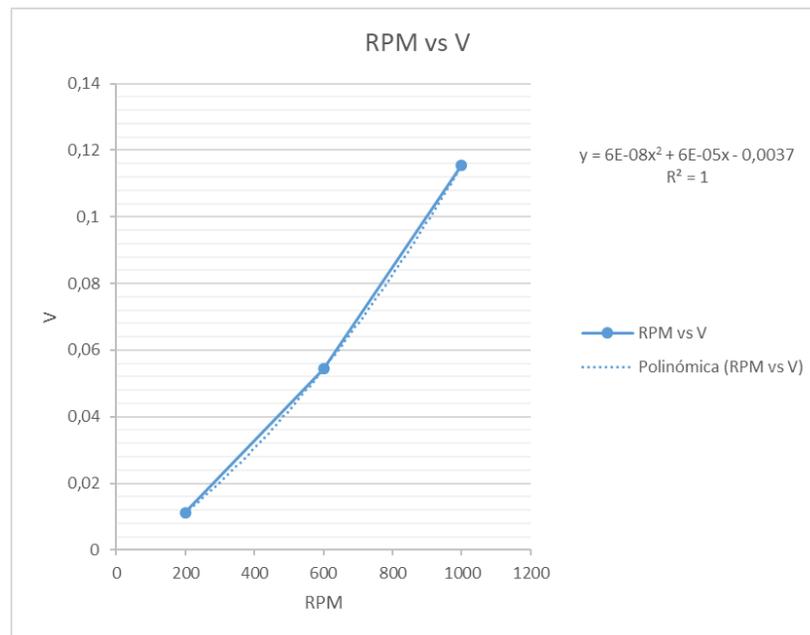


Figura 120. rpm vs V

La Figura 121 muestra la relación entre la velocidad resultante en la zona del termopar y el HTC. Cabe destacar que en estas figuras de relaciones con el HTC, hay temperaturas para las cuales la relación no se comporta lógicamente pues presenta mayores valores de HTC a menores rpm y menores HTC a mayores rpm, lo cual es lógicamente falso, pero se puede explicar si se entiende que hay ciertas temperaturas para las cuales la estimación de HTC disminuye y luego vuelve a subir como se muestra en la Figura 122.

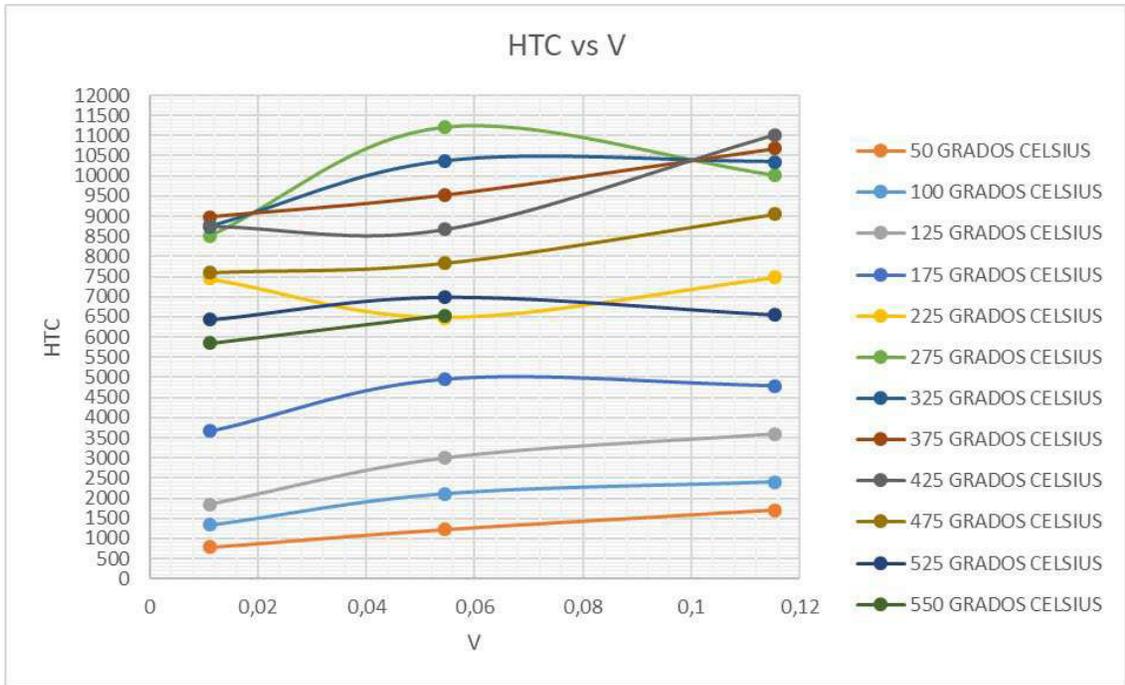


Figura 121. HTC vs V

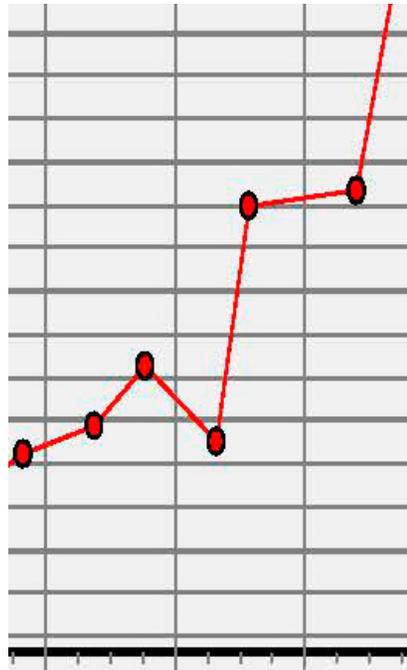


Figura 122. Tendencias erróneas en la estimación de HTC

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. CONCLUSIONES

PIV

En aras de resumir la presente investigación se puede aseverar que a través de la técnica de Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV), se pudo caracterizar el fluido en el experimento a detalle mostrando el movimiento específico del agua en todas las zonas, incluso en aquellas donde hay cambio de sección, lo cual mostró recirculación del fluido y heterogeneidad en su movimiento. Esto habla mucho de la geometría cuadrada del tanque, al punto de provocar un enfriamiento más rápido en la parte izquierda de la probeta.

Gracias al hecho de que el software permite exportar la información del fluido en archivos *.csv, se validó su utilización en otros softwares para un procesado más profundo como MATLAB o cualquier otro.

Es muy importante decir que los resultados que se obtuvieron de esta técnica son completamente válidos y replicables con cierta precisión, la cual debe ser previamente evaluada antes de comenzar a utilizar la técnica, pues para propósitos de caracterización de fluidos con obtención de la magnitud de velocidades está completamente en rango de aceptabilidad más si se requiere precisión puntual espacial, como la evaluación de velocidades en zonas específicas en 3D, hay muchas variables que conspiraran en el proceso y el error aumenta.

FLUENT

Esta técnica es completamente aplicable al igual que la anterior para propósitos de caracterización con exactamente el mismo alcance. Se demostró que es útil como herramienta para validar mediciones experimentales como la técnica de PIV. Lo desfavorable que tiene la herramienta es que a medida que hay que

involucrar más fenómenos físicos, el resultado final se ve afectado en cierta medida y más si estos fenómenos a ser simulados van en serie o lo que es lo mismo que uno depende del otro. Nos brinda mayor flexibilidad a la hora de realizar análisis puntuales en zonas complicadas de ensayar en una medición de laboratorio y específicamente brinda la opción de mostrar resultados animados en tiempo real.

QUENCHOTEST

Se logró obtener la característica térmica de las probetas ensayadas a diferentes temperaturas, y específicamente las curvas de enfriamiento y razón de enfriamiento. Existe la duda de si el comportamiento del módulo de estimación de HTC es del todo correcto y/o aceptado por el hecho de los problemas de convergencia que arroja al momento de estimar el HTC a altas temperaturas.

Se obtuvo una correlación entre la agitación y el HTC, válida como primer paso para una investigación más profunda de doctorado donde se obtenga una correlación entre la velocidad de agitación y el HTC.

2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda hacer una medición más exhaustiva donde se hagan mínimo 3 repeticiones de cada corte y así establecer un diseño de experimento con más profundidad para evaluar la reproducibilidad del método PIV.
- Se recomienda probar un nuevo diseño de tanque de temple donde se omitan los errores de geometría y se optimice la homogeneidad del fluido a ser utilizado como medio de enfriamiento en tanques de temple para evaluación de aceites, polímeros, etc. Un ejemplo de esto es el diseño de Xia-wei YANG et al [8], donde se muestra un diseño con baffles

direccionales y cambios de sección con curvas suaves para un temple homogéneo en toda la superficie de la probeta.

- Se recomienda evaluar la posibilidad de mejorar la hidrodinámica del fluido en la vecindad de la probeta del Quenchtotest, a través de la implementación de una geometría de probeta óptima como la propuesta por B. Hernández-Morales [9]
- Se recomienda probar distintos modelos de cálculo en Fluent con la introducción de subrutinas para mejorar la convergencia del modelo de la ZONA 1 para lograr que al alimentar la entrada de la ZONA 1 con el perfil de velocidades y demás propiedades de la salida de la ZONA 2, la simulación corra y los residuales converjan sin problemas.
- Se recomienda usar la licencia pagada de FLUENT con preferencia de 8 nodos de cálculo, y ser implementada en un equipo de cómputo equipado para tales situaciones.
- Se recomienda llevar esta correlación obtenida a escala industrial con un modelo a escala de una tina de temple determinada para crear una herramienta que sirva como guía a la hora de realizar desarrollos de nuevos procesos de tratamiento térmico a través de la evaluación de la agitación óptima para obtener un HTC específico para el proceso.

BIBLIOGRAFIA

1. Garwood, D., et al., *Modeling of the flow distribution in an oil quench tank*. Journal of Materials Engineering and Performance, 1992. **1**(6): p. 781-787.
2. Fontecchio, M., M. Maniruzzaman, and R.D. Sisson Jr. *The effect of bath temperature and agitation rate on the quench severity of 6061 aluminum in distilled water*. in *Proceedings of the 21st heat treating society conference, Indianapolis*. 2002.
3. Barrena-Rodriguez, M.D., et al., *An Efficient Fluid-Dynamic Analysis to Improve Industrial Quenching Systems*. Metals, 2017. **7**(6).
4. Keane, R.D. and R.J. Adrian, *Theory of cross-correlation analysis of PIV images*. Applied scientific research, 1992. **49**(3): p. 191-215.
5. ASTM, *ASTM D 6482-06, "Standard Test Method for Determination of Cooling Characteristics of Aqueous Polymer Quenchants by Cooling Curve Analysis with Agitation (Tensi Method)"*. 2006.
6. ISO, *ISO 9950:1995, "Industrial quenching oils – Determination of Cooling characteristics – Nickel-alloy probe test method"*. 1995.
7. IVF, S., *IVF Smart Quench User's Manual*. 2009(1st Edition): p. 65.
8. Yang, X.-w., et al., *Optimum design of flow distribution in quenching tank for heat treatment of A357 aluminum alloy large complicated thin-wall workpieces by CFD simulation and ANN approach*. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013. **23**(5): p. 1442-1451.
9. Hernández-Morales, B., et al., *Hydrodynamic Behavior of Liquid Quenchants in the Vicinity of Quench Probes*.
10. Minocha, N., et al., *3D CFD simulation of passive decay heat removal system under boiling conditions: Role of bubble sliding motion on inclined heated tubes*. Chemical Engineering Science, 2016. **145**: p. 245-265.
11. Scarano, F. and M.L. Riethmuller, *Advances in iterative multigrid PIV image processing*. Experiments in Fluids, 2000. **29**(1): p. S051-S060.

12. Howson, M., et al., *An Analysis of the Quenching Performance of a Copper Nanofluid Prepared Using Laser Ablation*. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2016. **8**(4): p. 044501.
13. ASTM, *ASTM D 6200-01, "Standard Test Method for Determination of Cooling Characteristics of Quenching Oils by Cooling Curve Analysis"*. 2001.
14. Banka, J., et al., *CFD and FEA used to improve the quenching process*. Heat Treating Progress, 2008: p. 50-56.
15. Dobrev, I. and F. Massouh, *CFD and PIV investigation of unsteady flow through Savonius wind turbine*. Energy Procedia, 2011. **6**: p. 711-720.
16. Graftieaux, L., M. Michard, and N. Grosjean, *Combining PIV, POD and vortex identification algorithms for the study of unsteady turbulent swirling flows*. Measurement Science and technology, 2001. **12**(9): p. 1422.
17. Aronsson Rindby, C. and A. Sahlin, *Compilation and Validation of Heat Transfer Coefficients of Quenching Oils*. 2012.
18. Anderson, J.D. and J. Wendt, *Computational fluid dynamics*. Vol. 206. 1995: Springer.
19. Pletcher, R.H., J.C. Tannehill, and D. Anderson, *Computational fluid mechanics and heat transfer*. 2012: CRC press.
20. Koudil, Z., R. Ikkene, and M. Mouzali, *Cooling Capacity Optimization: Calculation of Hardening Power of Aqueous Solution Based on Poly (N-Vinyl-2-Pyrrolidone)*. Journal of materials engineering and performance, 2014. **23**(2): p. 551-559.
21. Ikkene, R., Z. Koudil, and M. Mouzali, *Cooling Characteristic of Polymeric Quenchant: Calculation of HTC and Prediction of Microstructure and Hardness*. Journal of materials engineering and performance, 2014. **23**(11): p. 3819-3830.
22. Totten, G., M. Dakins, and R. Heins, *Cooling curve analysis of synthetic quenchants—A historical perspective*. Journal of Heat Treating, 1988. **6**(2): p. 87-95.
23. Taraba, B., et al., *Effect of agitation work on heat transfer during cooling in oil isorapid 277HM*. Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 2012. **58**(2): p. 102-106.

24. Babu, K. and T.P. Kumar, *Effect of CNT concentration and agitation on surface heat flux during quenching in CNT nanofluids*. International journal of heat and mass transfer, 2011. **54**(1-3): p. 106-117.
25. Borovskoy, I., *Effect of the error in determination of the heat transfer coefficient on the simulation data for heat and mass transfer*. Russian Physics Journal, 2012. **55**(3): p. 296-300.
26. Rodríguez Altaif, R.d.J., *Estudio numérico experimental del distribuidor hidráulico de un colector solar de tubo al vacío tipo heat-pipe*. 2015, Universidad Autónoma de Nuevo León.
27. Tolsà García, J., *Estudio y optimización de una carena mediante CFD*. 2013.
28. Xiao, B., et al., *An experimental study of heat transfer in aluminum castings during water quenching*. Journal of Materials Processing Technology, 2010. **210**(14): p. 2023-2028.
29. Corvaro, F. and M. Paroncini, *An experimental study of natural convection in a differentially heated cavity through a 2D-PIV system*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009. **52**(1-2): p. 355-365.
30. Garcia, D., *A fast all-in-one method for automated post-processing of PIV data*. Experiments in fluids, 2011. **50**(5): p. 1247-1259.
31. Liu, C., X. Xu, and Z. Liu, *A FEM modeling of quenching and tempering and its application in industrial engineering*. Finite Elements in Analysis and Design, 2003. **39**(11): p. 1053-1070.
32. Mackerle, J., *Finite element analysis and simulation of quenching and other heat treatment processes: a bibliography (1976–2001)*. Computational materials science, 2003. **27**(3): p. 313-332.
33. Rudnev, V., D. Loveless, and R.L. Cook, *Handbook of induction heating*. 2017: CRC press.
34. Totten, G.E., C.E. Bates, and N. Clinton, *Handbook of quenchants and quenching technology*. 1993: ASM international.
35. Hasan, H., et al., *Heat transfer coefficients during quenching of steels*. Heat and mass transfer, 2011. **47**(3): p. 315-321.

36. Sala, J., et al., *Improvement of a chain-hardening furnace by computational fluid dynamics (CFD) simulation*. Applied energy, 2005. **81**(3): p. 260-276.
37. Kuzmin, D., *Introduction to computational fluid dynamics*. University of Dortmund, Dortmund, 2004.
38. Buczek, A. and T. Telejko, *Investigation of heat transfer coefficient during quenching in various cooling agents*. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2013. **44**: p. 358-364.
39. NANOTEKO, P.P.O.V. and I. PO, *Investigation of the cooling process with nanofluids according to ISO 9950 and ASTM D 6482 standards*. Materiali in tehnologije, 2013. **47**(1): p. 125-127.
40. Scarano, F. and M.L. Riethmuller, *Iterative multigrid approach in PIV image processing with discrete window offset*. Experiments in Fluids, 1999. **26**(6): p. 513-523.
41. Koutsiaris, A.G., D.S. Mathioulakis, and S. Tsangaris, *Microscope PIV for velocity-field measurement of particle suspensions flowing inside glass capillaries*. Measurement Science and Technology, 1999. **10**(11): p. 1037.
42. Meinhart, C.D., S.T. Wereley, and J.G. Santiago, *A PIV algorithm for estimating time-averaged velocity fields*. Journal of Fluids Engineering, 2000. **122**(2): p. 285-289.
43. Meinhart, C.D., S.T. Wereley, and J.G. Santiago, *PIV measurements of a microchannel flow*. Experiments in fluids, 1999. **27**(5): p. 414-419.
44. Ozalp, C., et al., *PIV measurements of flow through a sudden contraction*. Flow Measurement and Instrumentation, 2007. **18**(3-4): p. 121-128.
45. Thielicke, W. and E. Stamhuis, *PIVlab—towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB*. Journal of Open Research Software, 2014. **2**(1).
46. Ford, M.D., et al., *PIV-measured versus CFD-predicted flow dynamics in anatomically realistic cerebral aneurysm models*. Journal of biomechanical engineering, 2008. **130**(2): p. 021015.
47. Liscic, B., et al., *Quenching theory and technology*. 2010: CRC Press.

48. White, D., W. Take, and M. Bolton, *Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry*. Geotechnique, 2003. **53**(7): p. 619-631.
49. Lozano, D., et al. *Surface temperature and heat transfer coefficient determination during quenching for martensite fraction prediction using a parabolic heat transfer model*. in *Proc. 6th Int. Quenching and Control of Distortion Conf., Chicago, USA*. 2012.
50. Boutelier, D., *TecPIV—A MATLAB-based application for PIV-analysis of experimental tectonics*. Computers & geosciences, 2016. **89**: p. 186-199.
51. Liscic, B., H.M. Tensi, and W. Luty, *Theory and technology of quenching: a handbook*. 2013: Springer Science & Business Media.
52. Kinoshita, H., et al., *Three-dimensional measurement and visualization of internal flow of a moving droplet using confocal micro-PIV*. Lab on a Chip, 2007. **7**(3): p. 338-346.

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Enfoque euleriano.....	19
Figura 2. Enfoque lagrangiano.....	19
Figura 3. Representación esquemática de los experimentos.	24
Figura 4. Tanque de temple (original de Swerea IVF®).....	25
Figura 5. Cortes de láser para la extracción del comportamiento del fluido.....	27
Figura 6. Zona de interés durante el temple.	28
Figura 7. Setup experimental.....	29
Figura 8. Imagen proyectada por la barra.....	29
Figura 9. Densidad del polímero en el agua	30
Figura 10. Esquema del proyecto	33
Figura 11. Casilla de máxima dimensión	34
Figura 12. Zona 1 (zona de la propela).....	36
Figura 13. Zona 2 (zona de la probeta).....	36
Figura 14. Identificación de zonas en el fluido (plano centrado en (0;0;0)).....	38
Figura 15. Mallado de zona 1 (sección).....	40
Figura 16. Acercamiento a la propela en el mallado de la zona 1 (sección)	41
Figura 17. Interfase en zona cercana a la probeta (sección).....	42
Figura 18. Inflation layers en la pared de la probeta.....	43
Figura 19. Mallado de la zona 2 (sección).....	44
Figura 20. Plano IZQ DER CENT	52
Figura 21. Iconos de las etapas de la simulación.	53
Figura 22. Plano DER CENT luego de aplicar Iso Clips	54
Figura 23. Puntos de análisis (124)	57
Figura 24. Líneas de análisis (121).....	58
Figura 25. Ventana de transmisión de datos	61
Figura 26. Curvas de enfriamiento y razón de enfriamiento	62
Figura 27. Clasificación de las imágenes.....	66
Figura 28. PROP 1MM BAJO 600 rpm	67

Figura 29. BARRA 10 MM BAJO 200 rpm	68
Figura 30. BARRA 10 MM SOBRE 1000 rpm.....	69
Figura 31. Correlación entre la velocidad del flujo en el tanque de temple y la frecuencia de rotación de la propela en agua [5]	70
Figura 32. DER 10 MM 1000 rpm	70
Figura 33. DER CENT 600 rpm	71
Figura 34. IZQ 10 MM 1000 rpm.....	72
Figura 35. IZQ CENT a 1000 rpm	73
Figura 36. MEDIO 10 MM SOBRE a 200 rpm	74
Figura 37. MEDIO 10 MM BAJO a 1000 rpm.....	75
Figura 38. Contenido de las hojas de datos.....	76
Figura 39. Contenido de las hojas de datos arreglado con MATLAB® correspondiente al corte IZQ CENT.....	78
Figura 40. PROPELA 1MM BAJO en la ZONA 1 a 1000 rpm.....	79
Figura 41. BARRA 10 MM SOBRE en la ZONA 1 a 1000 rpm	80
Figura 42. BARRA 10 MM BAJO en la ZONA 1 a 1000 rpm	80
Figura 43. MEDIO 10 MM SOBRE en la ZONA 1 a 1000 rpm.....	81
Figura 44. DER CENT en la ZONA 1 a 1000 rpm.....	81
Figura 45. IZQ CENT en la ZONA 1 a 1000 rpm	82
Figura 46. DER 10 MM en la ZONA 1 a 1000 rpm.....	82
Figura 47. IZQ 10 MM en la ZONA 1 a 1000 rpm	83
Figura 48. PROPELA 1MM BAJO en la ZONA 1 a 1000 rpm.....	84
Figura 49. BARRA 10 MM SOBRE en la ZONA 1 a 1000 rpm	84
Figura 50. BARRA 10 MM BAJO en la ZONA 1 a 1000 rpm	85
Figura 51. MEDIO 10 MM SOBRE en la ZONA 1 a 1000 rpm.....	85
Figura 52. IZQ CENT en la ZONA 1 a 1000 rpm	86
Figura 53. DER CENT en la ZONA 1 a 1000 rpm.....	86
Figura 54. IZQ 10 MM en la ZONA 1 a 1000 rpm	87
Figura 55. DER 10 MM en la ZONA 1 a 1000 rpm.....	87
Figura 56. PROPELA 1MM BAJO en la ZONA 2 a 1000 rpm.....	88
Figura 57. BARRA 10 MM SOBRE en la ZONA 2 a 1000 rpm	89

Figura 58. BARRA 10 MM BAJO en la ZONA 2 a 1000 rpm	89
Figura 59 MEDIO 10 MM SOBRE en la ZONA 2 a 1000 rpm.....	90
Figura 60. MEDIO 10 MM BAJO en la ZONA 2 a 1000 rpm.....	90
Figura 61. DER 10 MM en la ZONA 2 a 1000 rpm.....	91
Figura 62. DER CENT en la ZONA 2 a 1000 rpm.....	91
Figura 63. IZQ 10 MM en la ZONA 2 a 1000 rpm.....	92
Figura 64. IZQ CENT en la ZONA 2 a 1000 rpm	92
Figura 65. PROPELA 1MM BAJO en la ZONA 2 a 1000 rpm.....	93
Figura 66. BARRA 10 MM SOBRE en la ZONA 2 a 1000 rpm	94
Figura 67. BARRA 10 MM BAJO en la ZONA 2 a 1000 rpm	95
Figura 68. MEDIO 10 MM BAJO en la ZONA 2 a 1000 rpm.....	95
Figura 69. MEDIO 10 MM SOBRE en la ZONA 2 a 1000 rpm.....	96
Figura 70. DER CENT en la ZONA 2 a 1000 rpm.....	96
Figura 71. IZQ CENT en la ZONA 2 a 1000 rpm	97
Figura 72. DER 10 MM en la ZONA 2 a 1000 rpm.....	98
Figura 73. IZQ 10 MM en la ZONA 2 a 1000 rpm	98
Figura 74. IZQ CENT (unida) 1000 rpm.....	99
Figura 75. DER CENT (unida) 1000 rpm	100
Figura 76. DER 10 MM (unida) 1000 rpm	101
Figura 77. IZQ 10 MM (unida) 1000 rpm.....	102
Figura 78. BARRA 10 MM SOBRE (unida) 1000 rpm.....	102
Figura 79. PROPELA 1 MM BAJO (unida) 1000 rpm	103
Figura 80. BARRA 10 MM BAJO (unida) 1000 rpm.....	104
Figura 81. MEDIO 10 MM SOBRE (unida) 1000 rpm	104
Figura 82. Curvas de enfriamiento/Razones de enfriamiento de las probetas 1001, 1002 y 1003 (128).....	106
Figura 83. Curvas de enfriamiento/Razones de enfriamiento de las probetas 1004, 1005 y 1006 (128).....	107
Figura 84. Curvas de enfriamiento/Razones de enfriamiento de las probetas 1007, 1008 y 1009	108
Figura 85. Curva de HTC vs T para la probeta 1001 a 1000 rpm	109

Figura 86. Curva de HTC vs T para la probeta 1002 a 600 rpm	110
Figura 87. Curva de HTC vs T para la probeta 1009 a 200 rpm (131).....	110
Figura 88. DER 10 MM 600 rpm obtenida por MATLAB®	111
Figura 89. DER 10 MM 600 rpm obtenida por DYNAMICS STUDIO® 2015 ..	112
Figura 90. Correlaciones de las velocidades entre el corte PROPELA 1 MM BAJO y DER 10 MM a las 3 velocidades de agitación.....	113
Figura 91. Correlaciones de las velocidades entre el corte PROPELA 1 MM BAJO y DER CENT a las 3 velocidades de agitación	114
Figura 92. Correlaciones de las velocidades entre el corte BARRA 10 MM BAJO y DER 10 MM a las 3 velocidades de agitación.....	115
Figura 93. Correlaciones de las velocidades entre el corte MEDIO 10 MM BAJO e IZQ CENT a las 3 velocidades de agitación.	115
Figura 94. Correlaciones de las velocidades entre el corte MEDIO 10 MM BAJO y DER CENT a las 3 velocidades de agitación	116
Figura 95. Errores de medición en la intersección de los cortes DER 10 MM y BARRA 10 MM BAJO para 1000 rpm.....	117
Figura 96. Errores de medición en la intersección de los cortes DER 10 MM y MEDIO 10 MM BAJO para 600 rpm.....	117
Figura 97. DER CENT a 1000 rpm (MATLAB®).....	119
Figura 98. DER CENT a 1000 rpm (FLUENT®)	119
Figura 99. IZQ CENT a 1000 rpm (MATLAB®).....	119
Figura 100. IZQ CENT a 1000 rpm (FLUENT®).....	119
Figura 101. IZQ CENT a 1000 rpm (PIV).....	120
Figura 102. IZQ CENT a 1000 rpm (FLUENT®).....	120
Figura 103. Errores de medición en la intersección de los cortes DER 10 MM y BARRA 10 MM BAJO para 1000 rpm.....	121
Figura 104. Errores de medición en la intersección de los cortes IZQ CENT y MEDIO 10 MM SOBRE para 200 rpm.	121
Figura 105. Errores de medición de las componentes de velocidad entre FLUENT y PIV para la línea de análisis IZQ BAR VERTICAL	123

Figura 106. Errores de medición de las componentes de velocidad entre FLUENT y PIV para la línea de análisis DER BAR VERTICAL	123
Figura 107. Errores de medición de las componentes de velocidad entre FLUENT y PIV para la línea de análisis BOT BAR HORIZONTAL	124
Figura 108. Distribución del error en los puntos de análisis para 1000 rpm ...	125
Figura 109. Distribución del error en los puntos de análisis para 600 rpm	126
Figura 110. Distribución del error en los puntos de análisis para 200 rpm	126
Figura 111. Comportamiento del fluido en la vecindad de la probeta	127
Figura 112. Vectores en zona de termopar 1000 rpm. Corte horizontal.	128
Figura 113. Vectores en zona de termopar 1000 rpm. Corte Vertical.	128
Figura 114. Comparación de curvas de enfriamiento y razones de enfriamiento para 1000 rpm.....	130
Figura 115. Comparación de curvas de enfriamiento y razones de enfriamiento para 600 rpm.....	131
Figura 116. Comparación de curvas de enfriamiento y razones de enfriamiento para 200 rpm.....	131
Figura 117. HTC vs T para la probeta 1005.....	132
Figura 118. HTC vs T para el último set de experimentos	134
Figura 119. HTC vs rpm.....	134
Figura 120. rpm vs V.....	135
Figura 121. HTC vs V	136
Figura 122. Tendencias erróneas en la estimación de HTC	136
Figura 123. Láser LITRON® serie LDY PIV 302.....	155
Figura 124. Cámara SpeedSense® Lab 320 (M320).....	155
Figura 125. Tanque de temple (construido en acrílico transparente).....	156
Figura 126. Sistema de posicionamiento universal de 3 ejes de ISEL®.....	156
Figura 127. Dynamics Studio® 2015 de Dantec Dynamics®.....	157
Figura 128. PROPELA 1 MM BAJO.....	158
Figura 129. BARRA 10 MM SOBRE	158
Figura 130. BARRA 10 MM BAJO	158
Figura 131. DER 10 MM	158

Figura 132. DER CENT	159
Figura 133. IZQ CENT	159
Figura 134. MEDIO 10 MM BAJO	159
Figura 135. IZQ 10 MM	159
Figura 136. MEDIO 10 MM SOBRE	159
Figura 137. PROPELA 1 MM BAJO 200 rpm	160
Figura 138. PROPELA 1 MM BAJO 600 rpm	160
Figura 139. PROPELA 1 MM BAJO 1000 rpm	161
Figura 140. BARRA 10 MM BAJO 200 rpm	161
Figura 141. BARRA 10 MM BAJO 600 rpm	162
Figura 142. BARRA 10 MM BAJO 1000 rpm	162
Figura 143. BARRA 10 MM SOBRE 200 rpm	163
Figura 144. BARRA 10 MM SOBRE 600 rpm	163
Figura 145. BARRA 10 MM SOBRE 1000 rpm	164
Figura 146. DER 10 MM 200 rpm	164
Figura 147. DER 10 MM 600 rpm	165
Figura 148. DER 10 MM 1000 rpm	165
Figura 149. DER CENT 200 rpm	166
Figura 150. DER CENT 600 rpm	166
Figura 151. DER CENT 1000 rpm	167
Figura 152. IZQ 10 MM 200 rpm	167
Figura 153. IZQ 10 MM 600 rpm	168
Figura 154. IZQ 10 MM 1000 rpm	168
Figura 155. IZQ CENT 200 rpm	169
Figura 156. IZQ CENT 600 rpm	169
Figura 157. IZQ CENT 1000 rpm	170
Figura 158. MEDIO 10 MM SOBRE 200 rpm	170
Figura 159. MEDIO 10 MM SOBRE 600 rpm	171
Figura 160. MEDIO 10 MM SOBRE 1000 rpm	171
Figura 161. MEDIO 10 MM BAJO 200 rpm	172
Figura 162. MEDIO 10 MM BAJO 600 rpm	172

Figura 163. MEDIO 10 MM BAJO 1000 rpm.....	173
Figura 164. PROPELA 1MM BAJO en la ZONA 1 a 1000 rpm.....	174
Figura 165. PROPELA 1MM BAJO en la ZONA 2 a 1000 rpm.....	174
Figura 166. BARRA 10 MM BAJO en la ZONA 1 a 1000 rpm	175
Figura 167. BARRA 10 MM BAJO en la ZONA 2 a 1000 rpm	175
Figura 168. BARRA 10 MM SOBRE en la ZONA 1 a 1000 rpm	176
Figura 169. BARRA 10 MM SOBRE en la ZONA 2 a 1000 rpm	176
Figura 170. DER 10 MM en la ZONA 1 a 1000 rpm.....	177
Figura 171. DER 10 MM en la ZONA 2 a 1000 rpm.....	178
Figura 172. DER CENT en la ZONA 1 a 1000 rpm.....	179
Figura 173. DER CENT en la ZONA 2 a 1000 rpm.....	180
Figura 174. IZQ 10 MM en la ZONA 1 a 1000 rpm	181
Figura 175. IZQ 10 MM en la ZONA 2 a 1000 rpm	182
Figura 176. IZQ CENT en la ZONA 1 a 1000 rpm	183
Figura 177. IZQ CENT en la ZONA 2 a 1000 rpm	184
Figura 178. MEDIO 10 MM SOBRE en la ZONA 1 a 1000 rpm.....	185
Figura 179. MEDIO 10 MM SOBRE en la ZONA 2 a 1000 rpm.....	185
Figura 180. MEDIO 10 MM BAJO en la ZONA 2 a 1000 rpm	186
Figura 181. 200 rpm.....	187
Figura 182. 600 rpm.....	187
Figura 183. 1000 rpm.....	187
Figura 184. 200 rpm.....	187
Figura 185. 600 rpm.....	187
Figura 186. 1000 rpm.....	187
Figura 187. 200 rpm.....	188
Figura 188. 600 rpm.....	188
Figura 189. 1000 rpm.....	188
Figura 190. 200 rpm.....	188
Figura 191. 600 rpm.....	188
Figura 192. 1000 rpm.....	188
Figura 193. 200 rpm.....	189

Figura 194. 600 rpm.....	189
Figura 195. 1000 rpm.....	189
Figura 196. 200 rpm.....	189
Figura 197. 600 rpm.....	189
Figura 198. 1000 rpm.....	189
Figura 199. 200 rpm.....	190
Figura 200. 600 rpm.....	190
Figura 201. 1000 rpm.....	190
Figura 202. 200 rpm.....	190
Figura 203. 600 rpm.....	190
Figura 204. 1000 rpm.....	190
Figura 205. 200 rpm.....	191
Figura 206. 600 rpm.....	191
Figura 207. 1000 rpm.....	191
Figura 208. PROPELA 1 MM BAJO 1000 rpm.....	192
Figura 209. MEDIO 10 MM SOBRE 1000 rpm.....	192
Figura 210. IZQ CENT 1000 rpm.....	193
Figura 211. IZQ 10 MM 1000 rpm.....	193
Figura 212. DER CENT 1000 rpm.....	194
Figura 213. DER 10 MM 1000 rpm.....	194
Figura 214. BARRA 10 MM SOBRE.....	195
Figura 215. BARRA 10 MM BAJO 1000 rpm.....	195
Figura 216. BARRA 10 MM BAJO 1000 rpm.....	196
Figura 217. BARRA 10 MM SOBRE 1000 rpm.....	196
Figura 218. DER 10 MM 1000 rpm.....	197
Figura 219. DER CENT 1000 rpm.....	197
Figura 220. IZQ 10 MM 1000 rpm.....	198
Figura 221. IZQ CENT 1000 rpm.....	198
Figura 222. MEDIO 10 MM BAJO 1000 rpm.....	199
Figura 223. MEDIO 10 MM SOBRE 1000 rpm.....	199
Figura 224. PROPELA 1 MM BAJO 1000 rpm.....	200

Figura 225. IZQ 10 MM 600 rpm.....	200
Figura 226. DER CENT 600 rpm	201
Figura 227. DER 10 MM 600 rpm	201
Figura 228. BARRA 10 MM SOBRE 600 rpm.....	202
Figura 229. BARRA 10 MM BAJO 600 rpm	202
Figura 230. PROPELA 1 MM BAJO 600 rpm	203
Figura 231. MEDIO 10 MM SOBRE 600 rpm	203
Figura 232. MEDIO 10 MM BAJO 600 rpm.....	204
Figura 233. IZQ CENT 600 rpm.....	204
Figura 234. PROPELA 1 MM BAJO 200 rpm	205
Figura 235. MEDIO 10 MM SOBRE 200 rpm	205
Figura 236. MEDIO 10 MM BAJO 200 rpm.....	206
Figura 237. IZQ CENT 200 rpm.....	206
Figura 238. IZQ 10 MM 200 rpm.....	207
Figura 239. DER CENT 200 rpm	207
Figura 240. DER 10 MM 200 rpm	208
Figura 241. BARRA 10 MM SOBRE	208
Figura 242. BARRA 10 MM BAJO 200 rpm	209

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Nombres de los cortes	27
Tabla 2. Coordenadas de los puntos	58
Tabla 3. Coordenadas de las líneas de análisis.....	59
Tabla 4. Números de probeta	59

APENDICES

APENDICE A. COMPONENTES DEL EXPERIMENTO PIV



Figura 123. Láser LITRON® serie LDY PIV 302

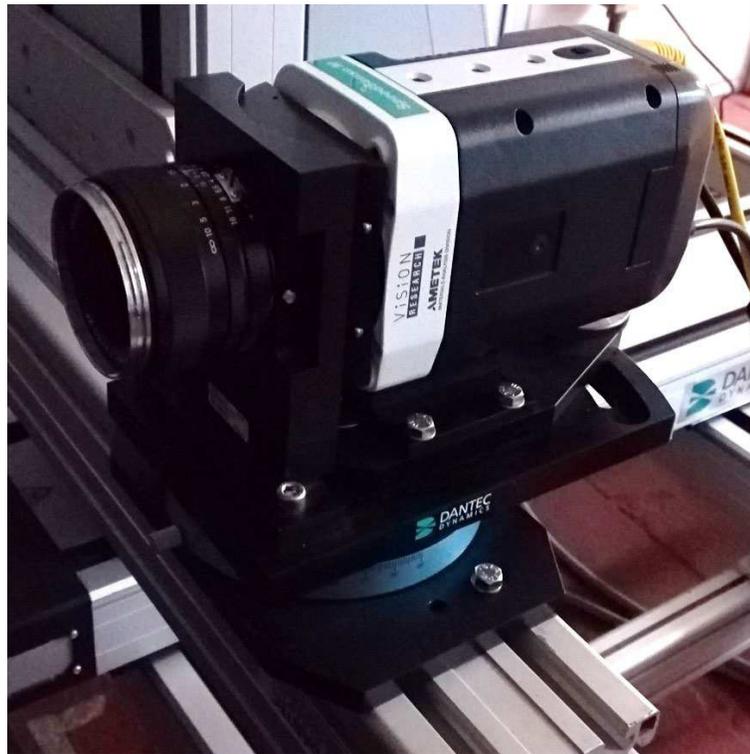


Figura 124. Cámara SpeedSense® Lab 320 (M320)



Figura 125. Tanque de temple (construido en acrílico transparente)



Figura 126. Sistema de posicionamiento universal de 3 ejes de ISEL®

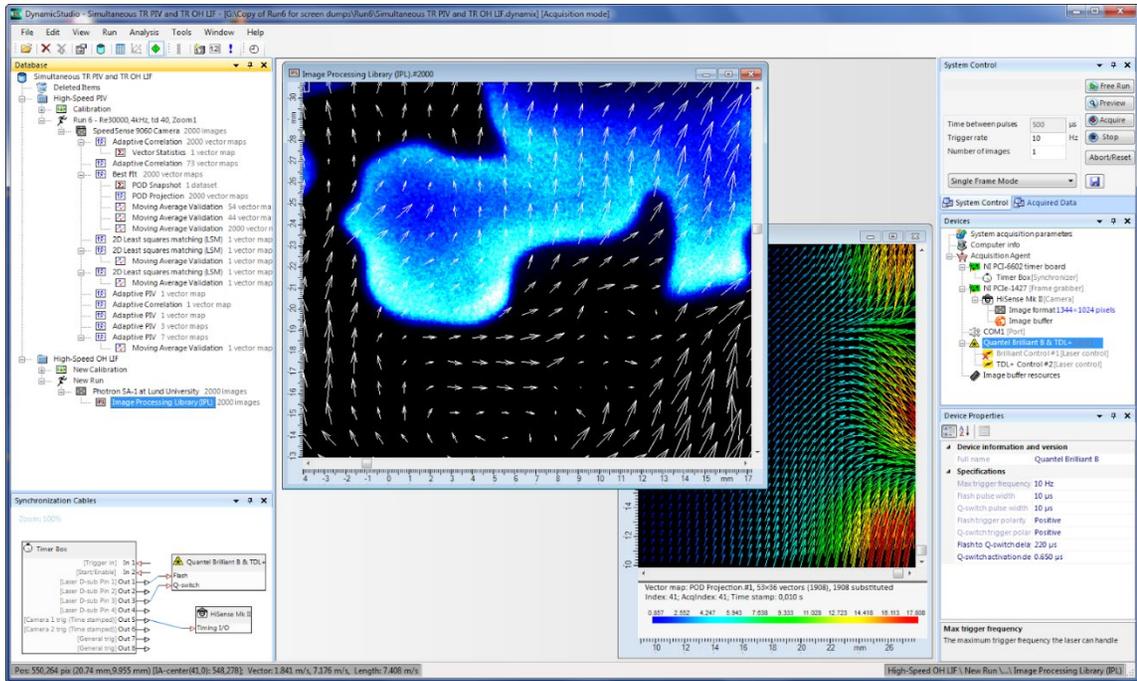


Figura 127. Dynamics Studio® 2015 de Dantec Dynamics®

APENDICE B. IMAGENES DE LOS CORTES TOMADAS CON LA CAMARA

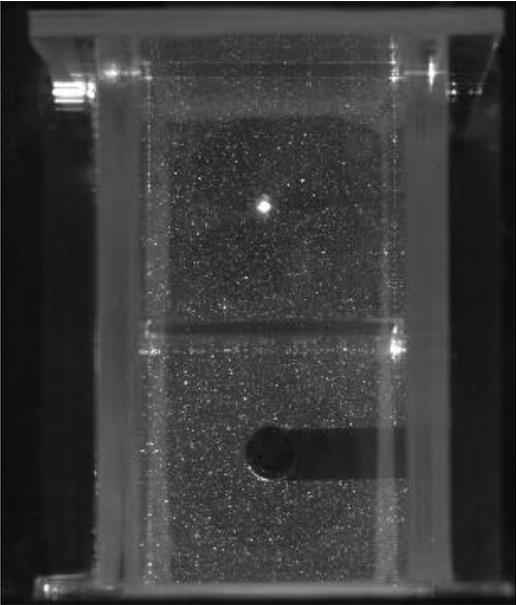


Figura 128. PROPELA 1 MM BAJO

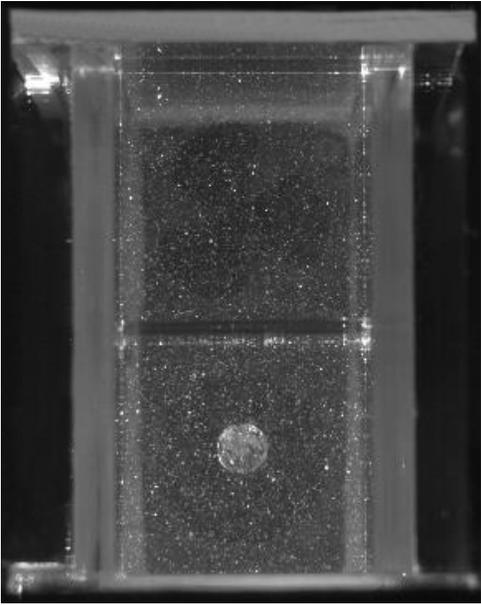


Figura 130. BARRA 10 MM BAJO

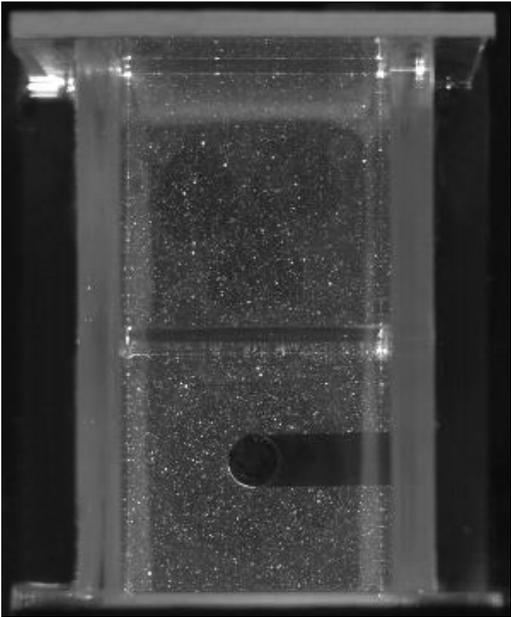


Figura 129. BARRA 10 MM SOBRE

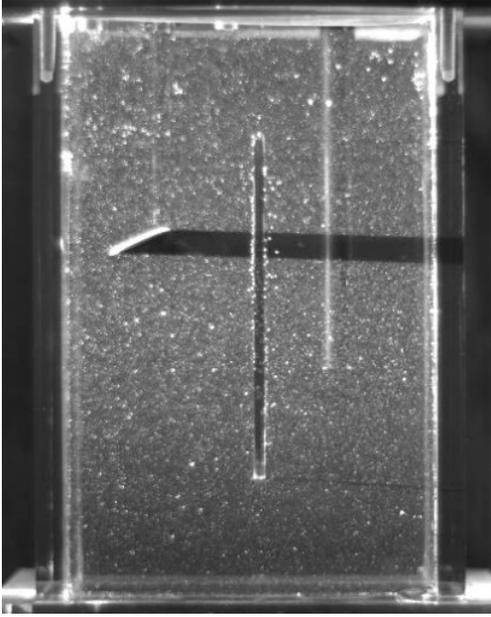


Figura 131. DER 10 MM

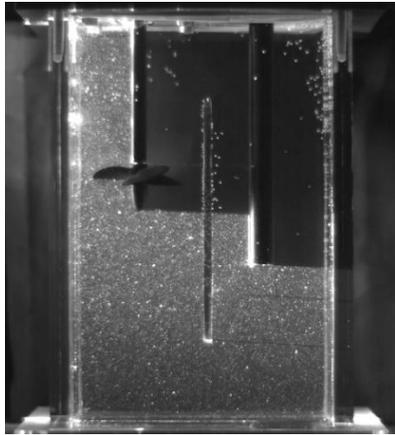


Figura 132. DER CENT

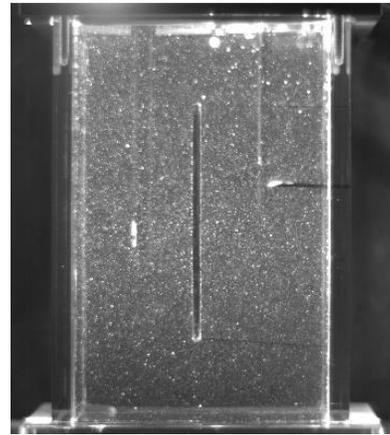


Figura 135. IZQ 10 MM

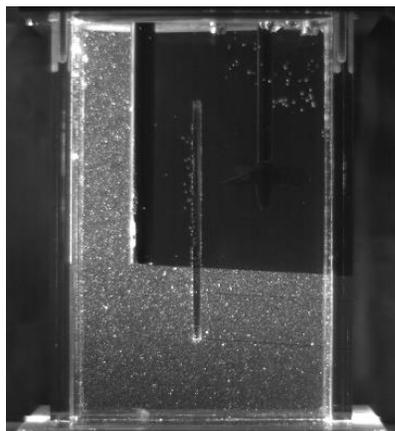


Figura 133. IZQ CENT

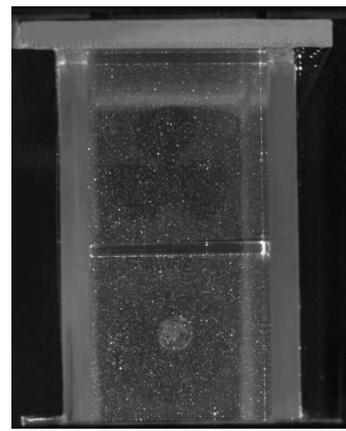


Figura 136. MEDIO 10 MM SOBRE

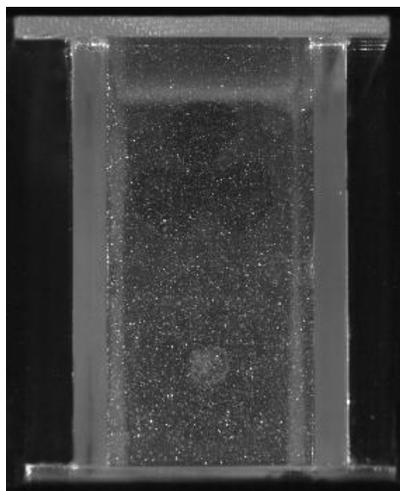


Figura 134. MEDIO 10 MM BAJO

APENDICE C. IMÁGENES DE VECTORES EXPORTADAS POR EL DYNAMICS STUDIO® 2015

1. CORTE PROPELA 1 MM BAJO

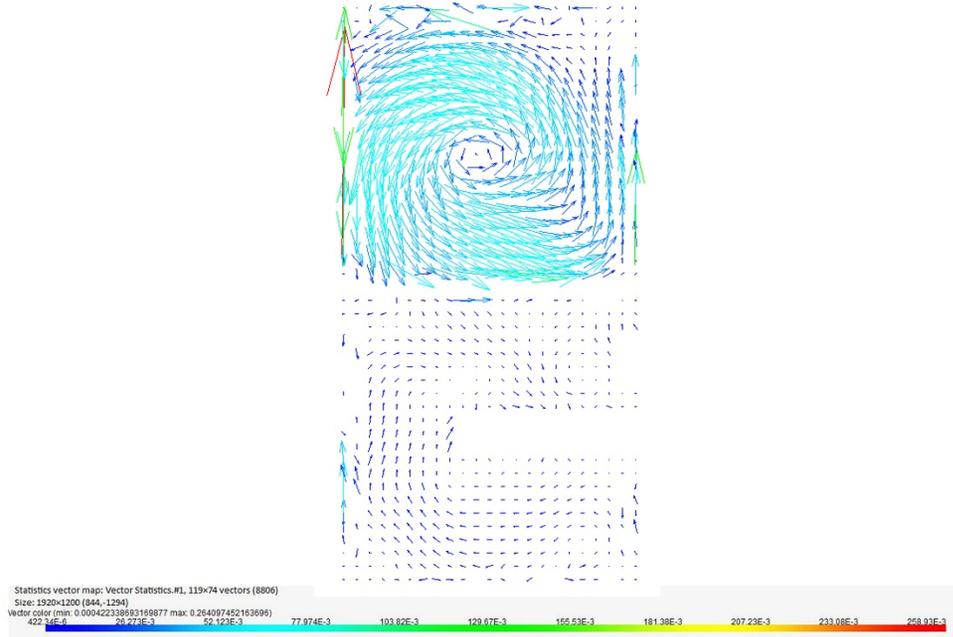


Figura 137. PROPELA 1 MM BAJO 200 rpm

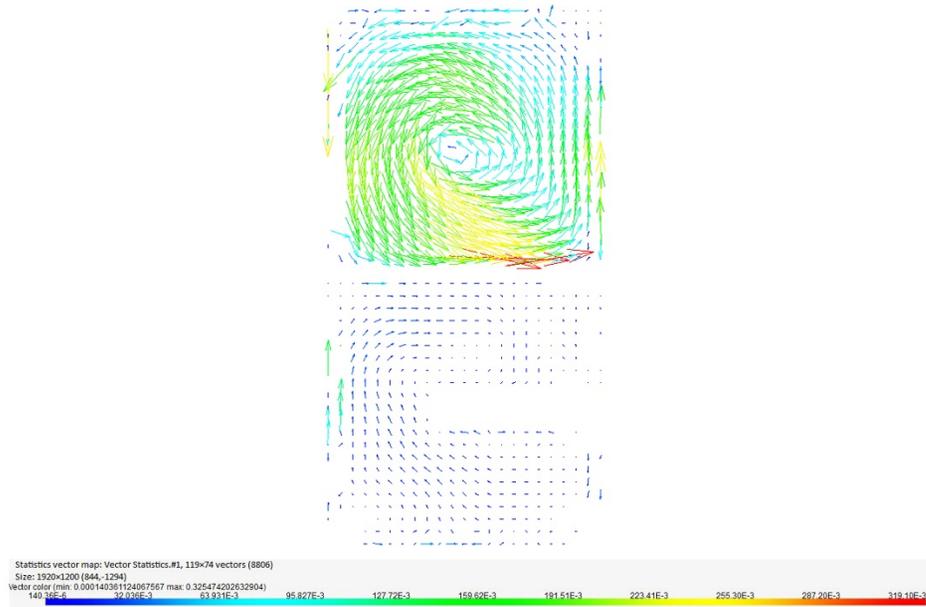


Figura 138. PROPELA 1 MM BAJO 600 rpm

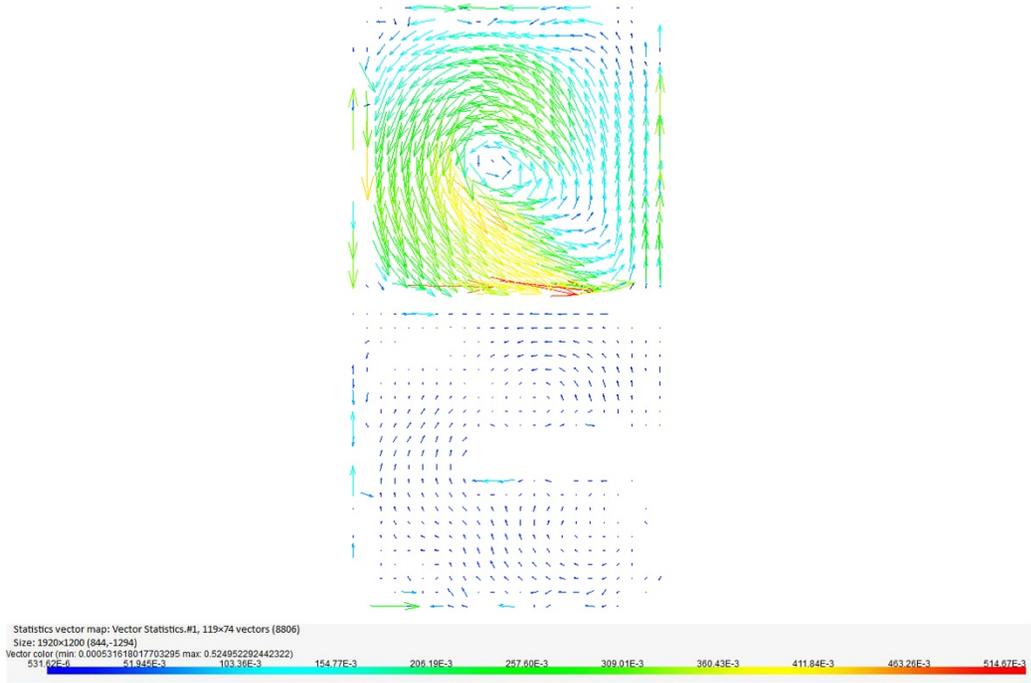


Figura 139. PROPELA 1 MM BAJO 1000 rpm

2. CORTE BARRA 10 MM BAJO

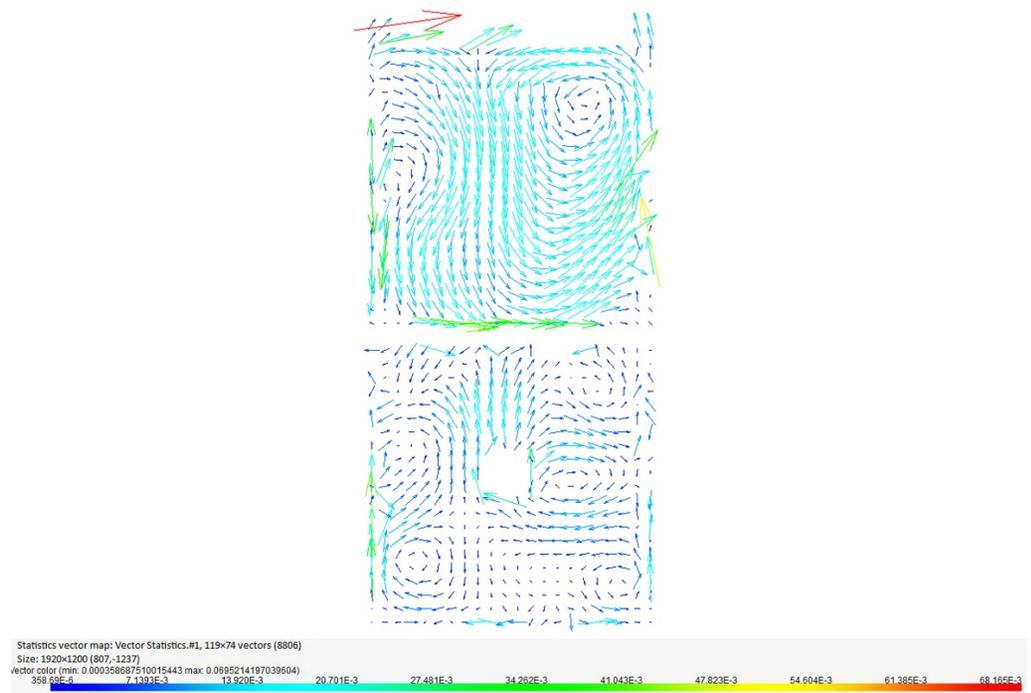


Figura 140. BARRA 10 MM BAJO 200 rpm

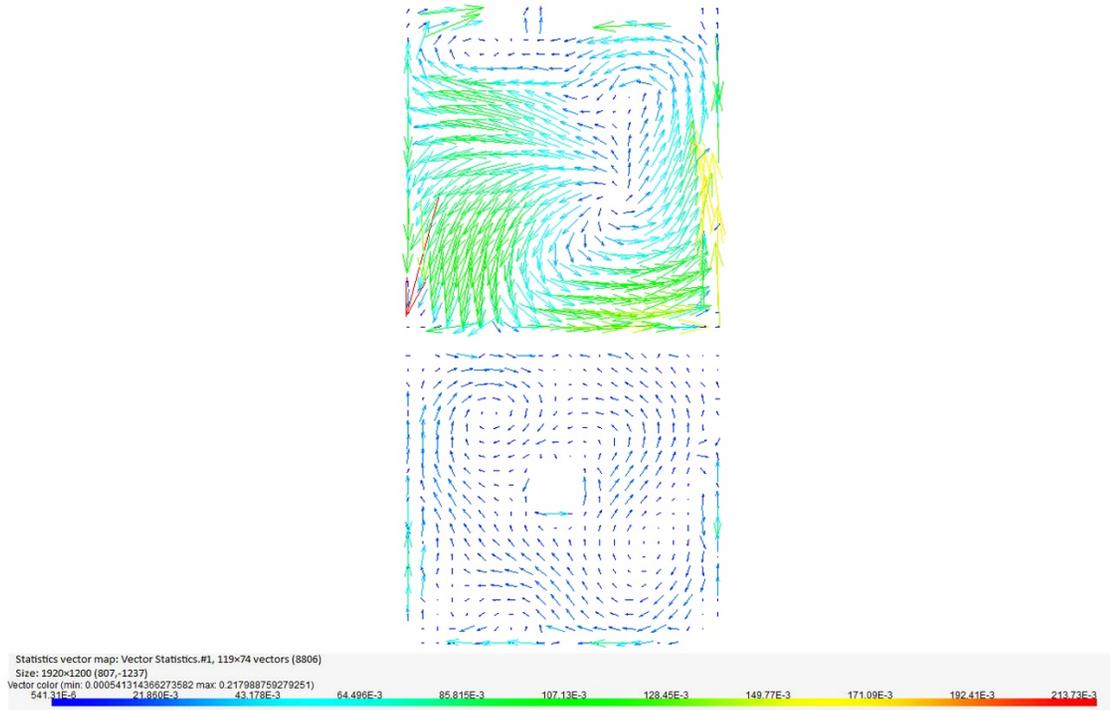


Figura 141. BARRA 10 MM BAJO 600 rpm

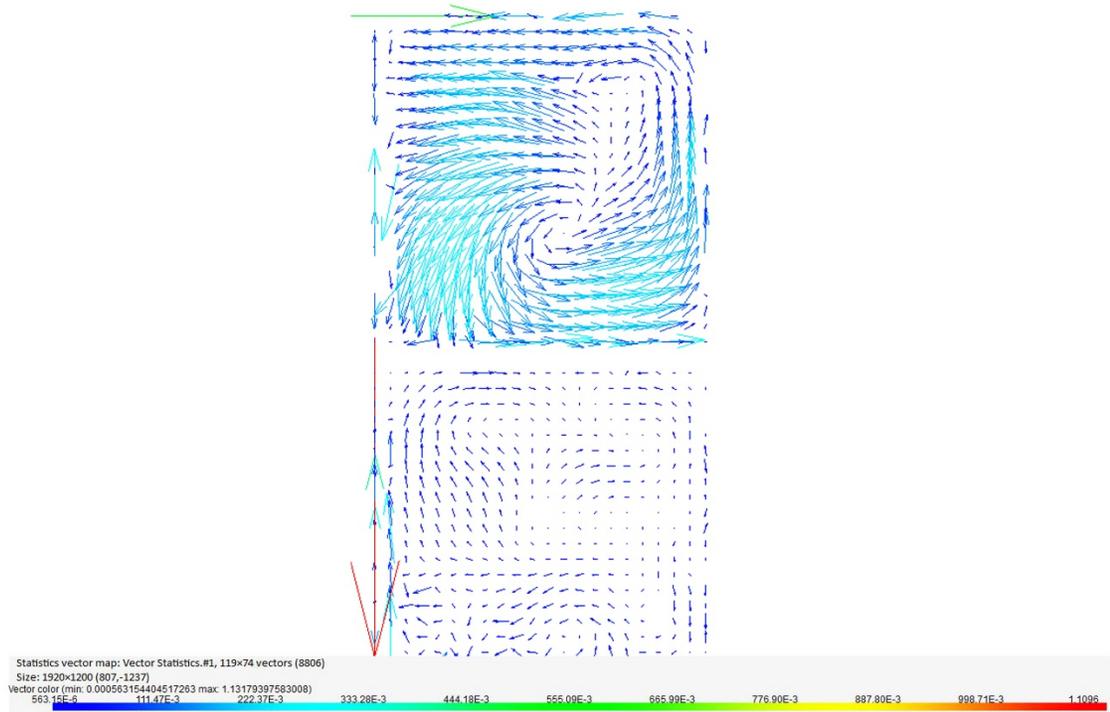


Figura 142. BARRA 10 MM BAJO 1000 rpm

3. CORTE BARRA 10 MM SOBRE

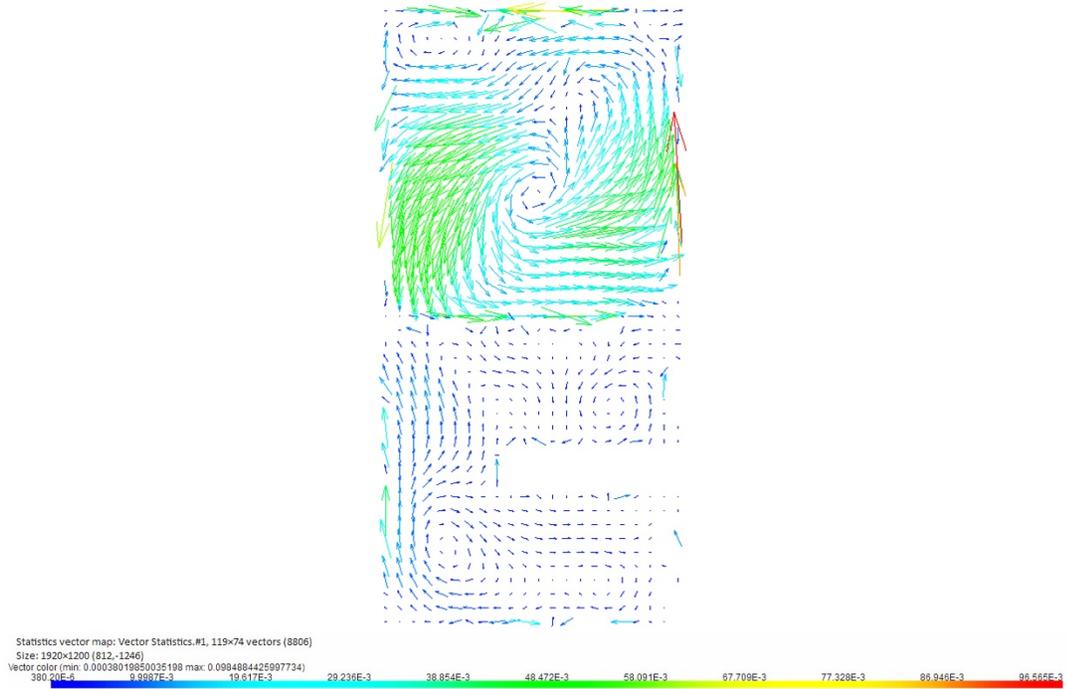


Figura 143. BARRA 10 MM SOBRE 200 rpm

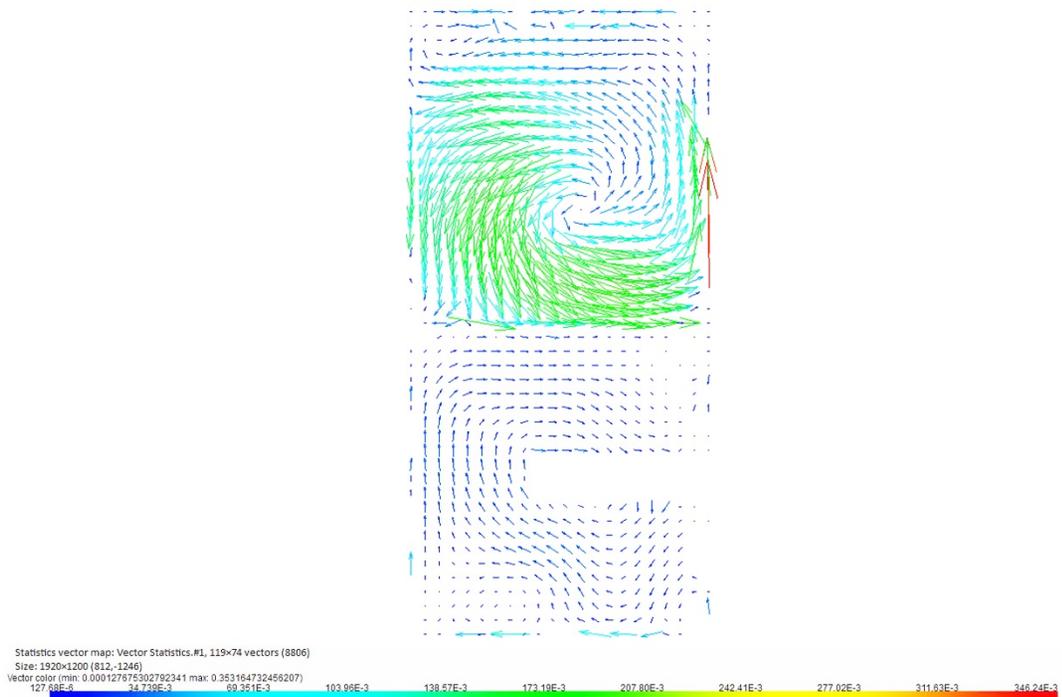


Figura 144. BARRA 10 MM SOBRE 600 rpm

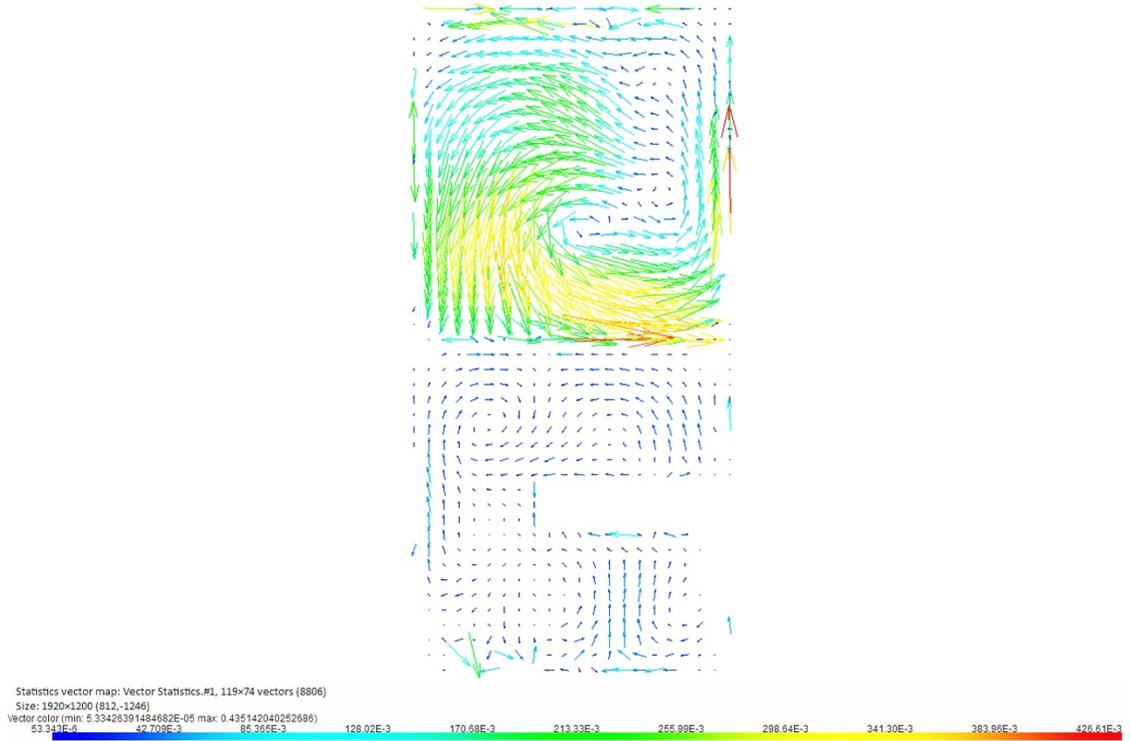


Figura 145. BARRA 10 MM SOBRE 1000 rpm

4. CORTE DER 10 MM

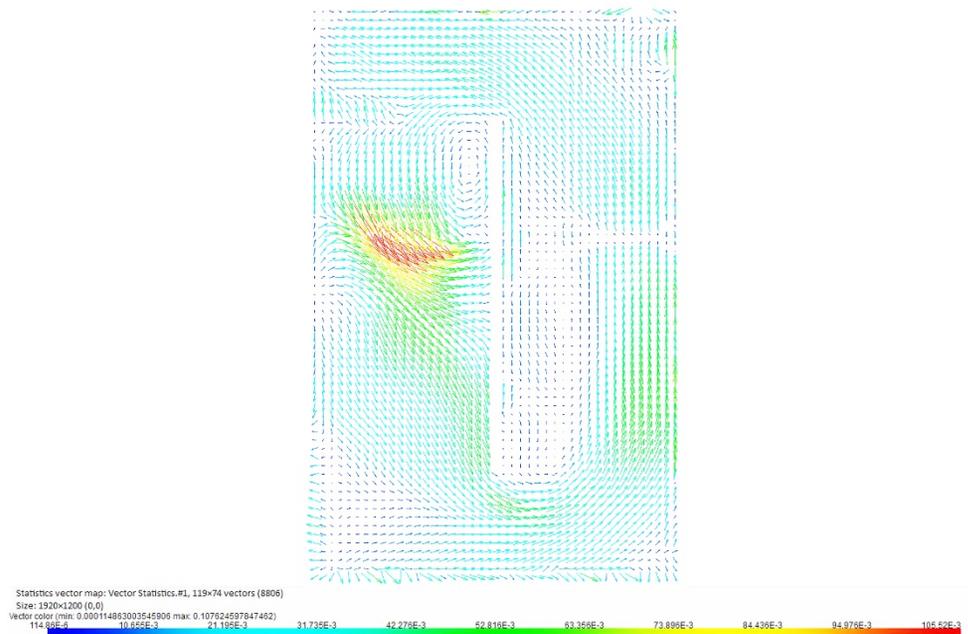


Figura 146. DER 10 MM 200 rpm

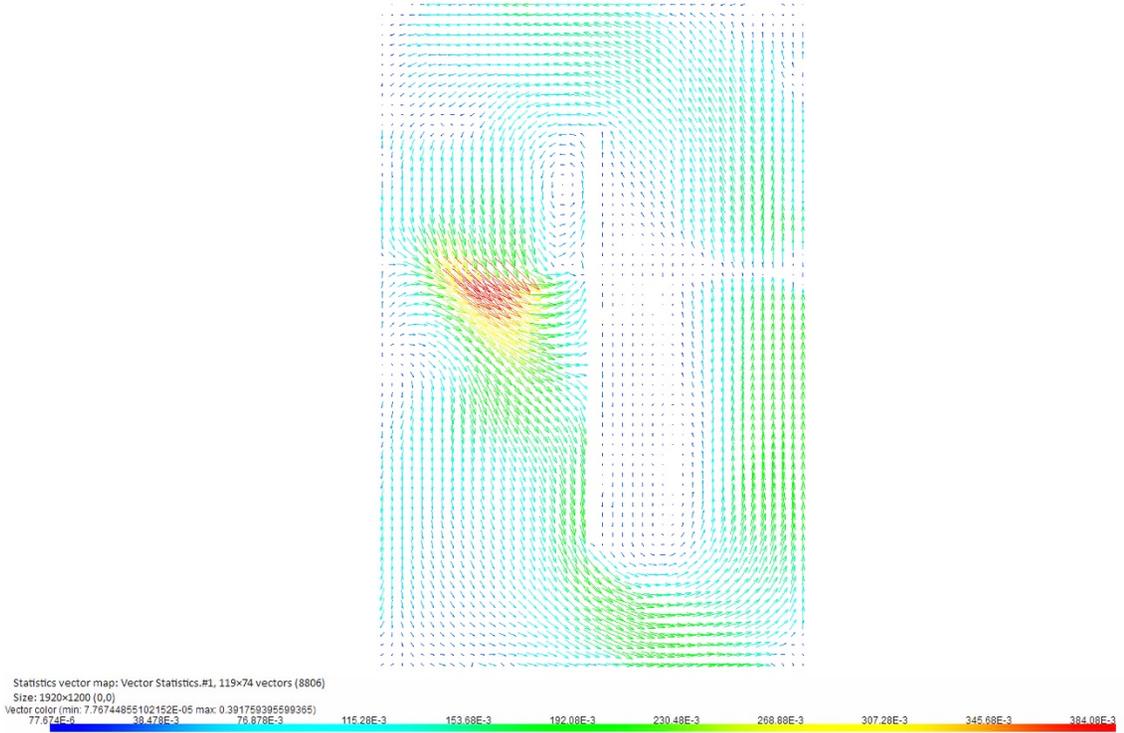


Figura 147. DER 10 MM 600 rpm

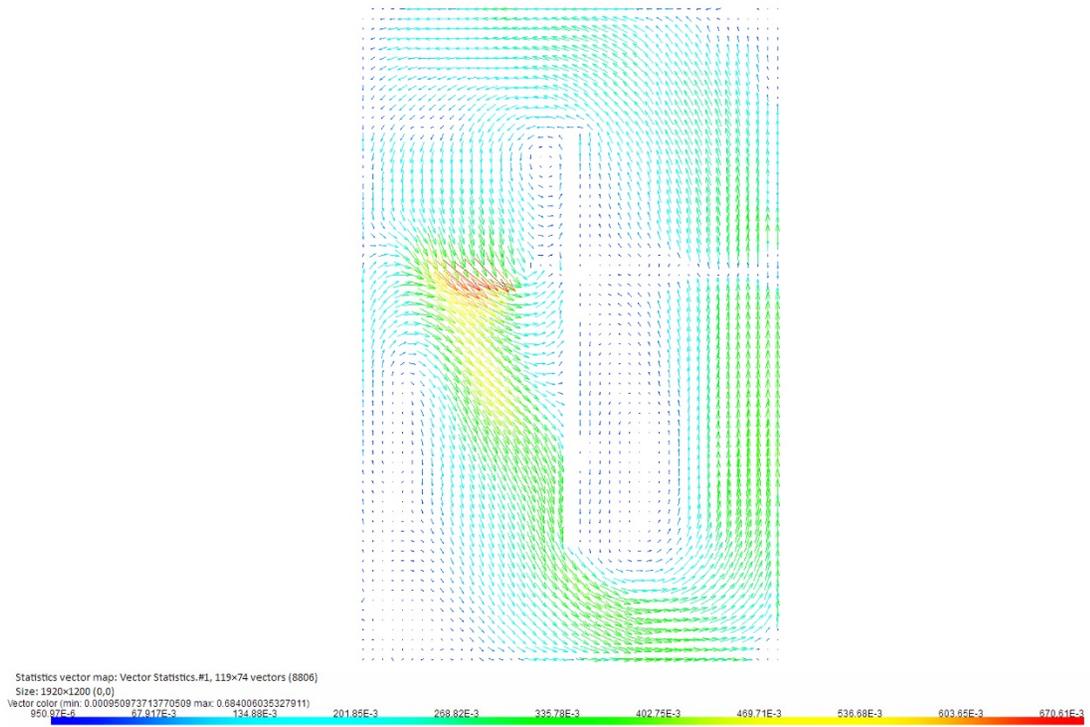


Figura 148. DER 10 MM 1000 rpm

5. CORTE DER CENT

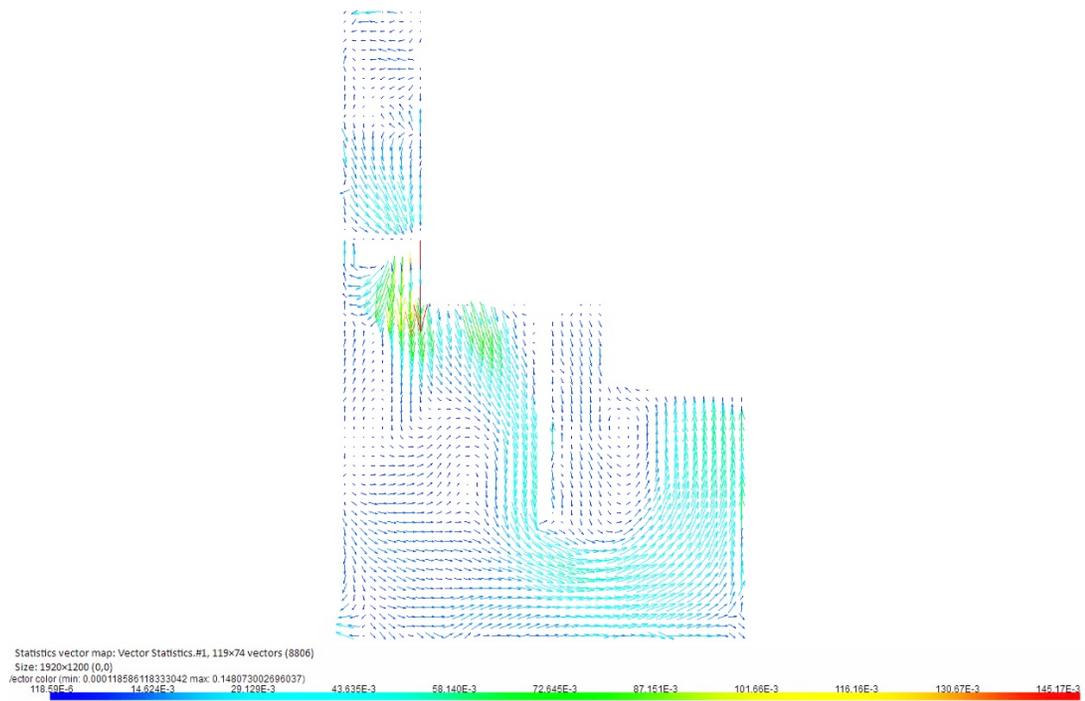


Figura 149. DER CENT 200 rpm

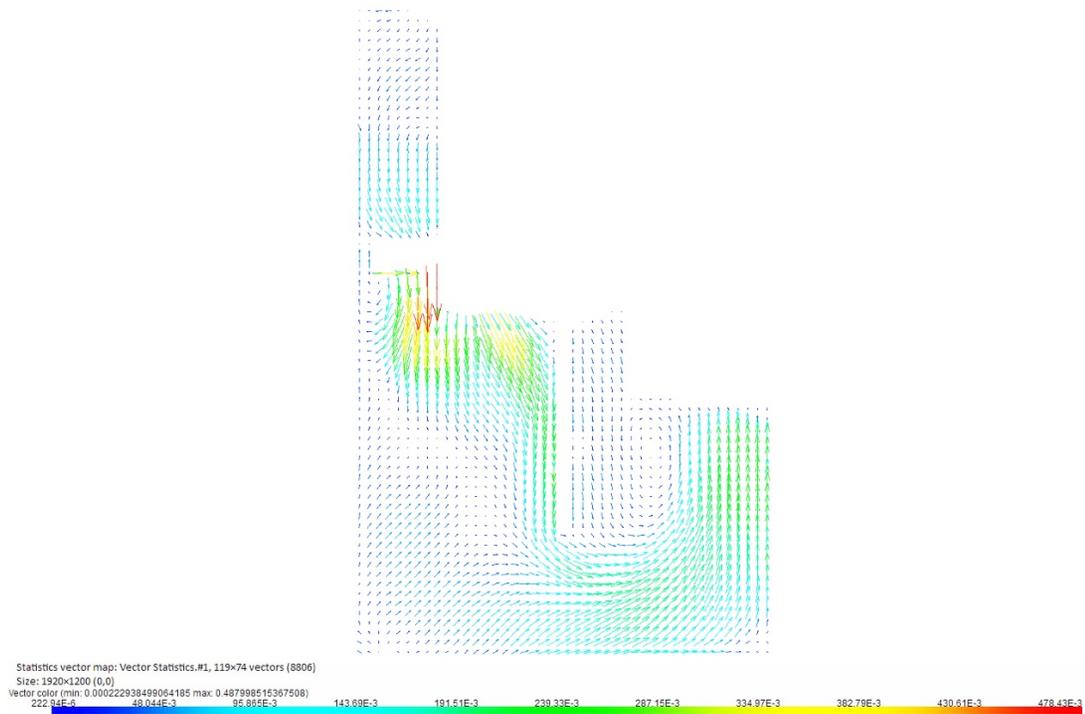


Figura 150. DER CENT 600 rpm

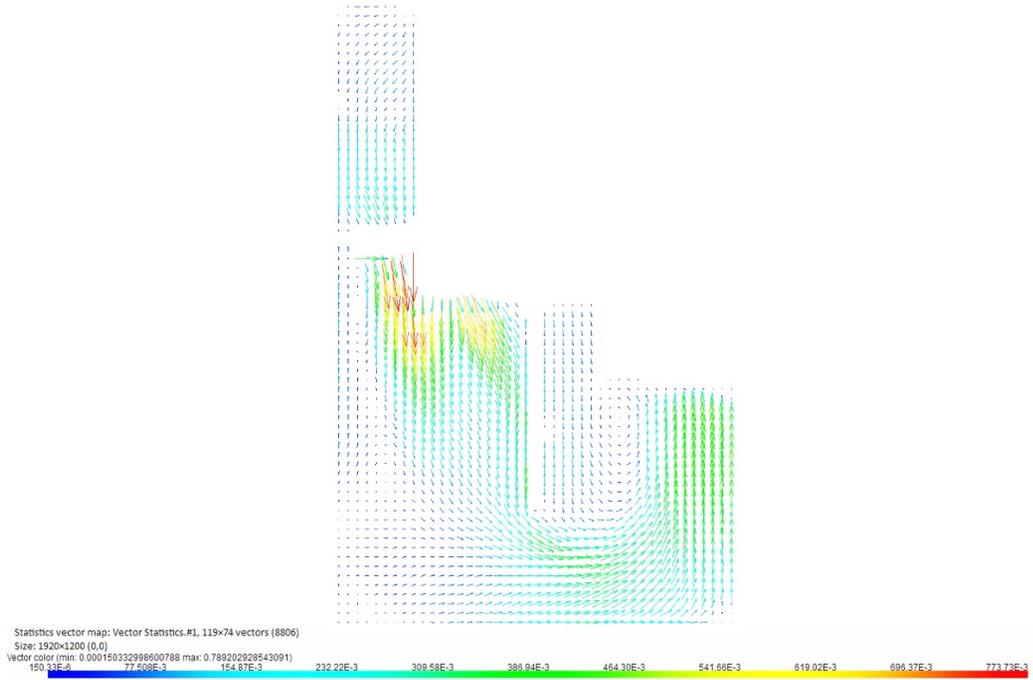


Figura 151. DER CENT 1000 rpm

6. CORTE IZQ 10 MM

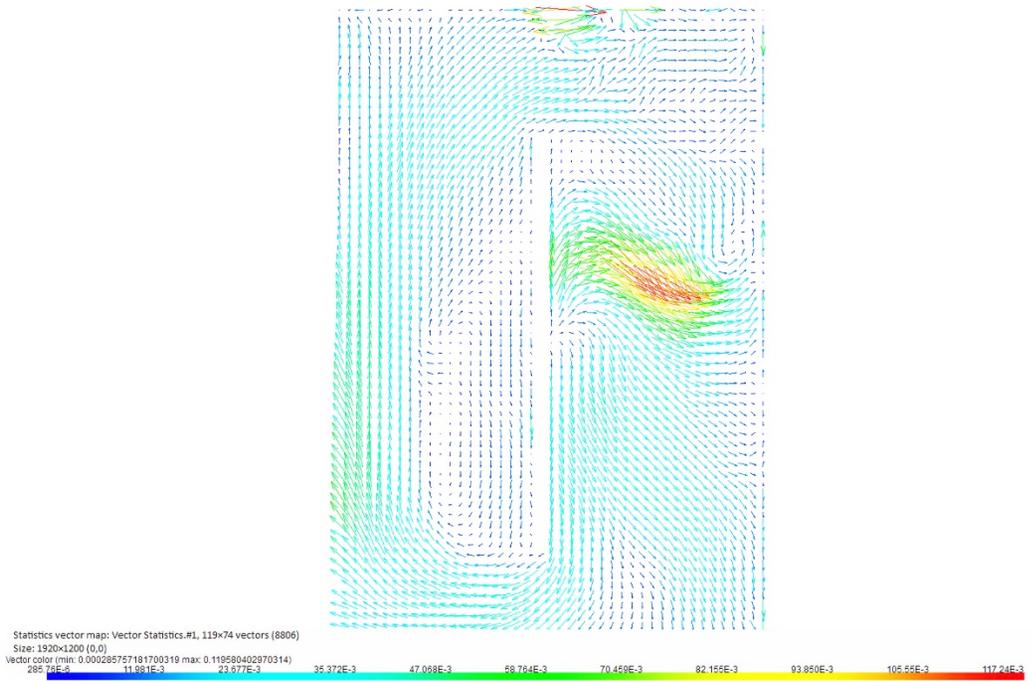


Figura 152. IZQ 10 MM 200 rpm

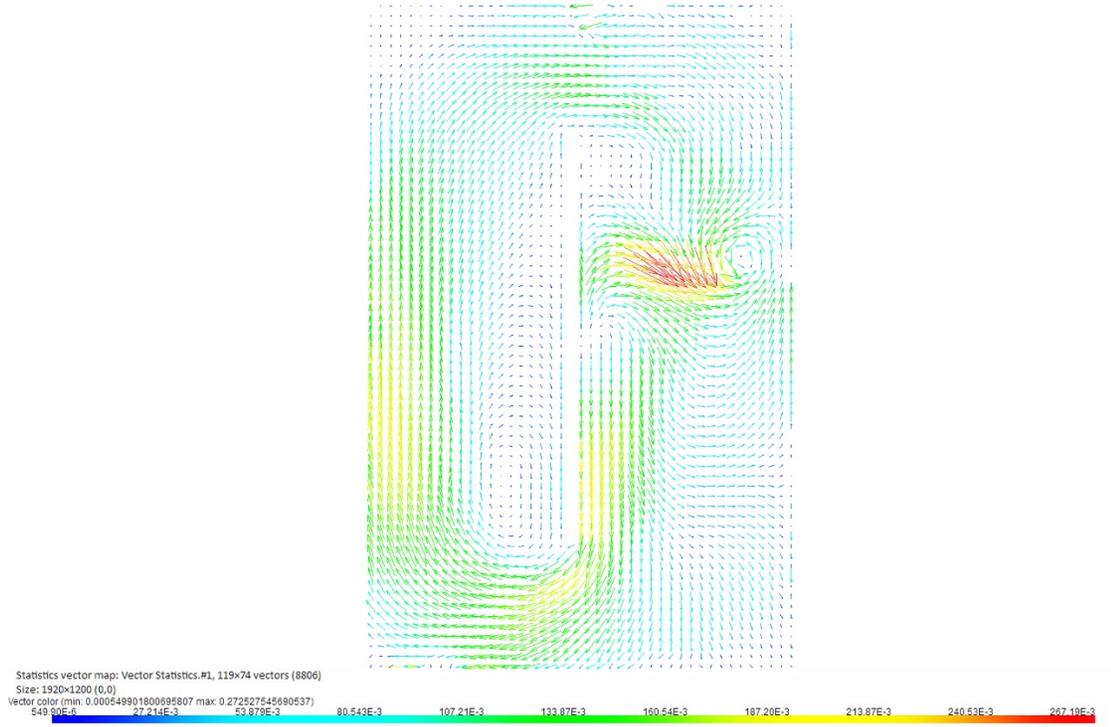


Figura 153. IZQ 10 MM 600 rpm

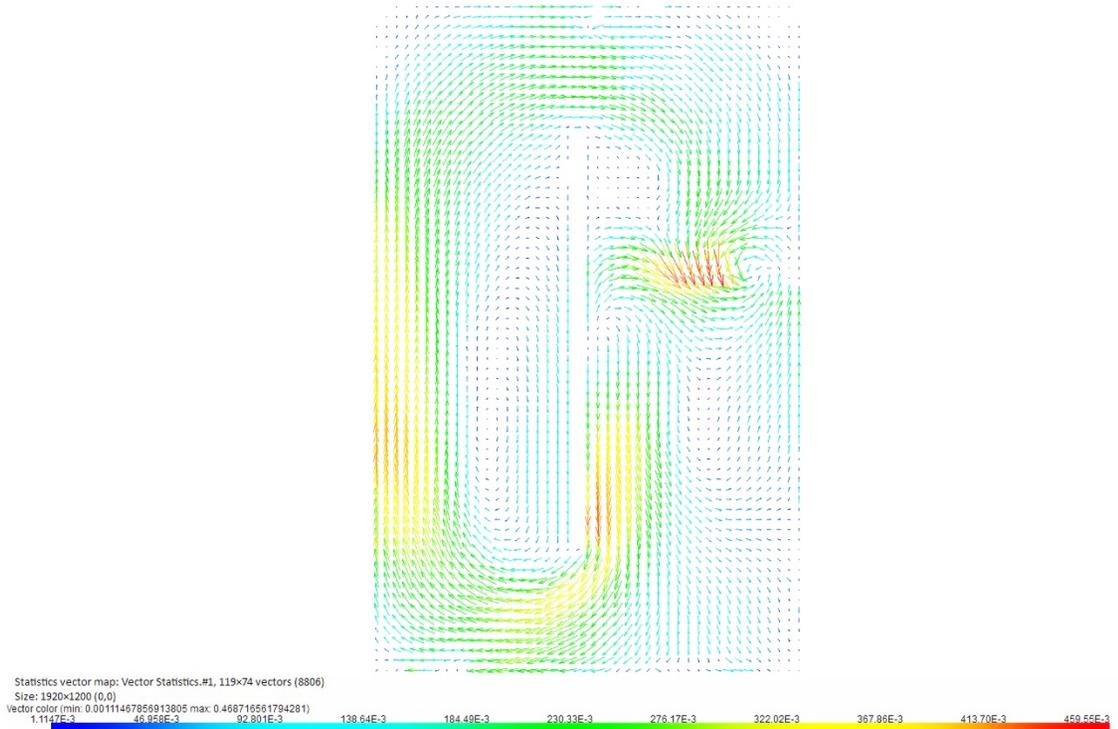


Figura 154. IZQ 10 MM 1000 rpm

7. CORTE IZQ CENT

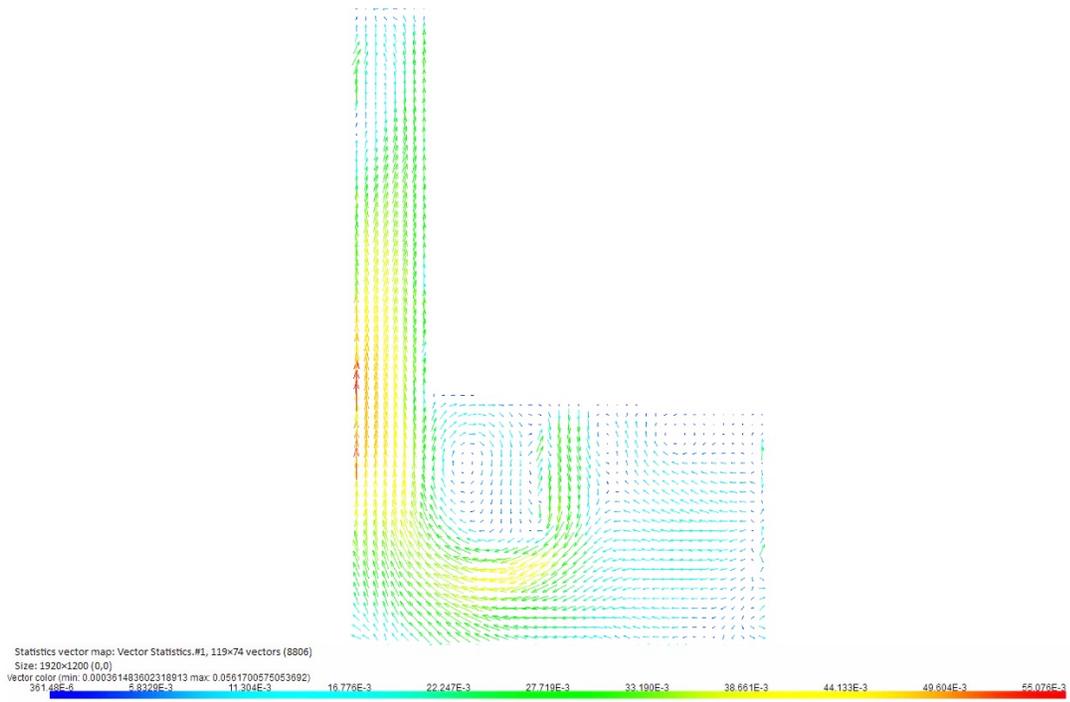


Figura 155. IZQ CENT 200 rpm

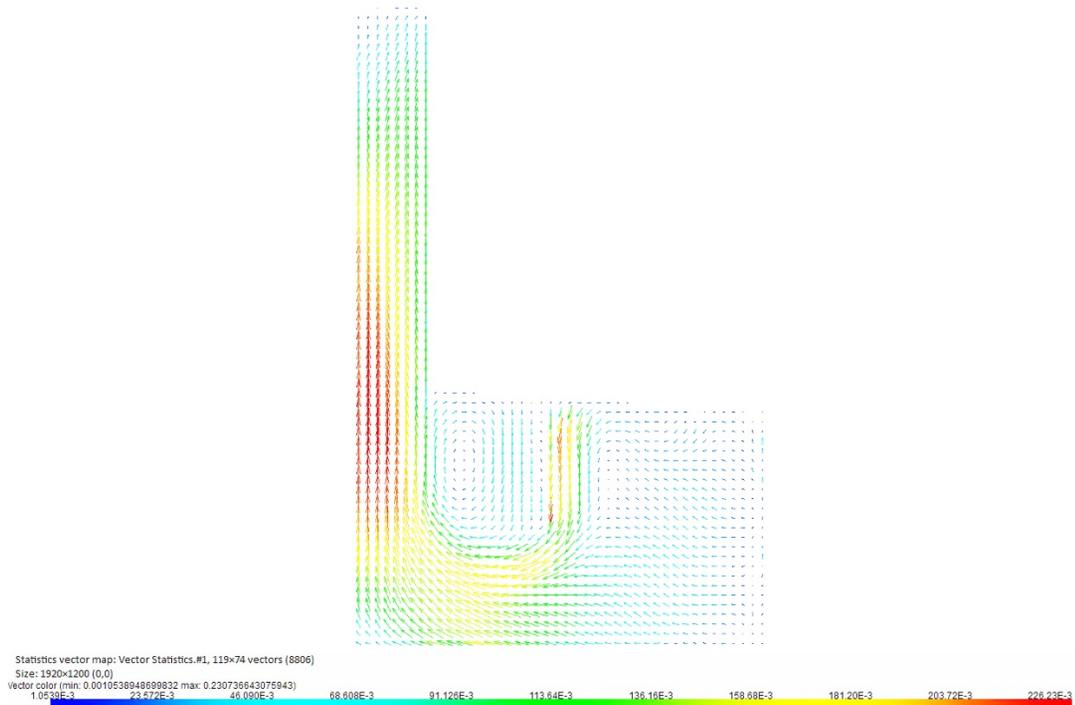


Figura 156. IZQ CENT 600 rpm

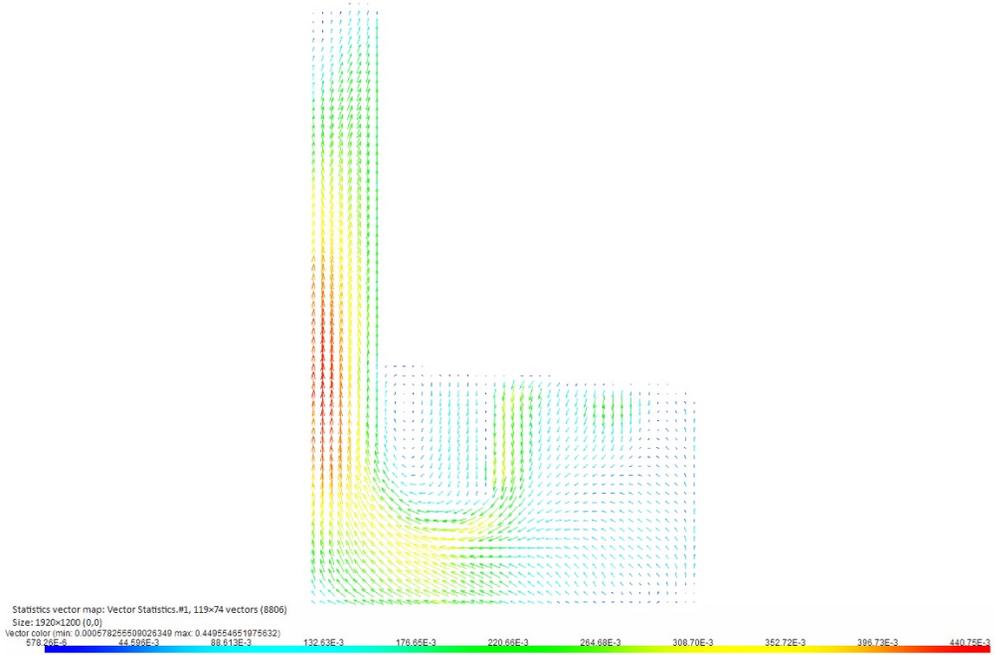


Figura 157. IZQ CENT 1000 rpm

8. CORTE MEDIO 10 MM SOBRE

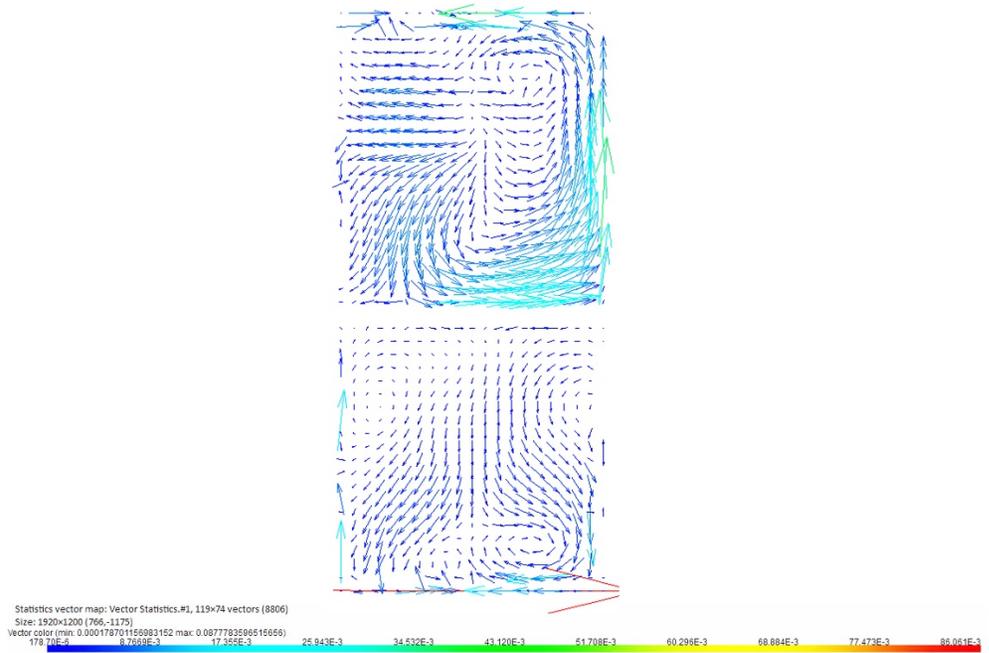


Figura 158. MEDIO 10 MM SOBRE 200 rpm

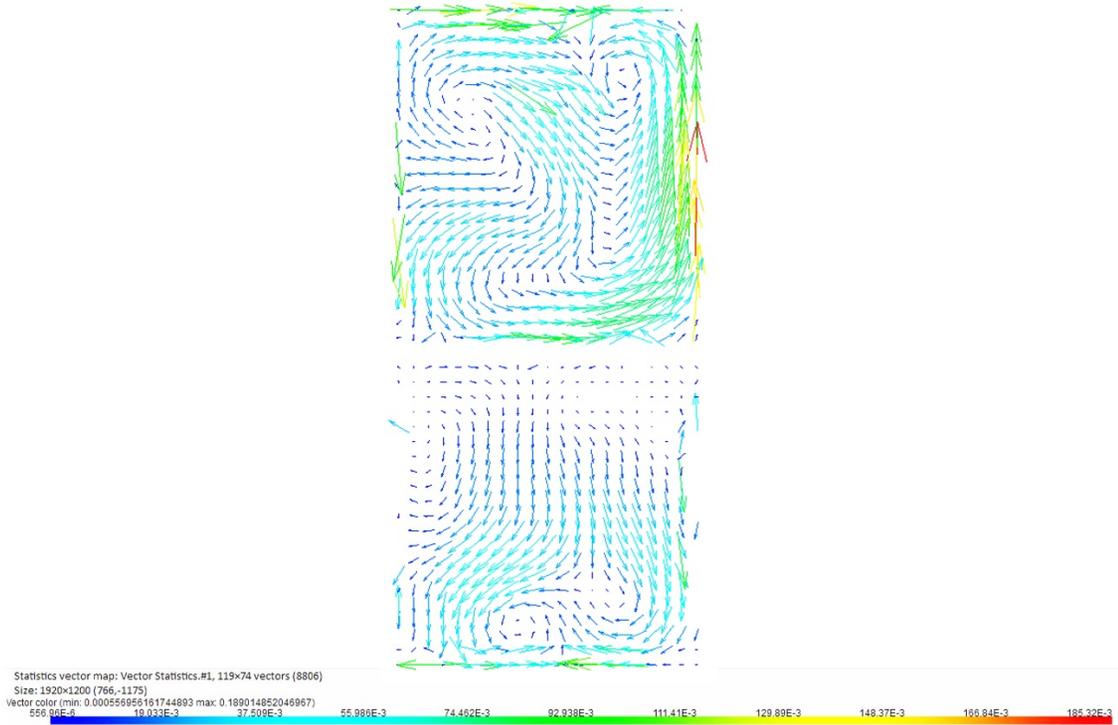


Figura 159. MEDIO 10 MM SOBRE 600 rpm

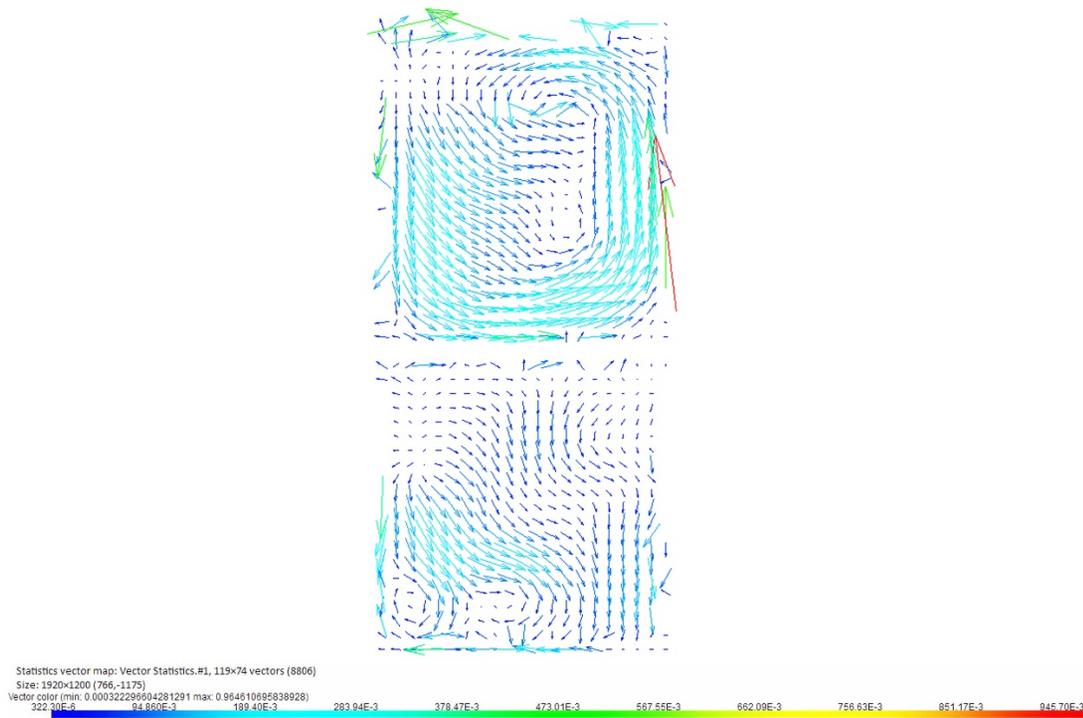


Figura 160. MEDIO 10 MM SOBRE 1000 rpm

9. CORTE MEDIO 10 MM BAJO

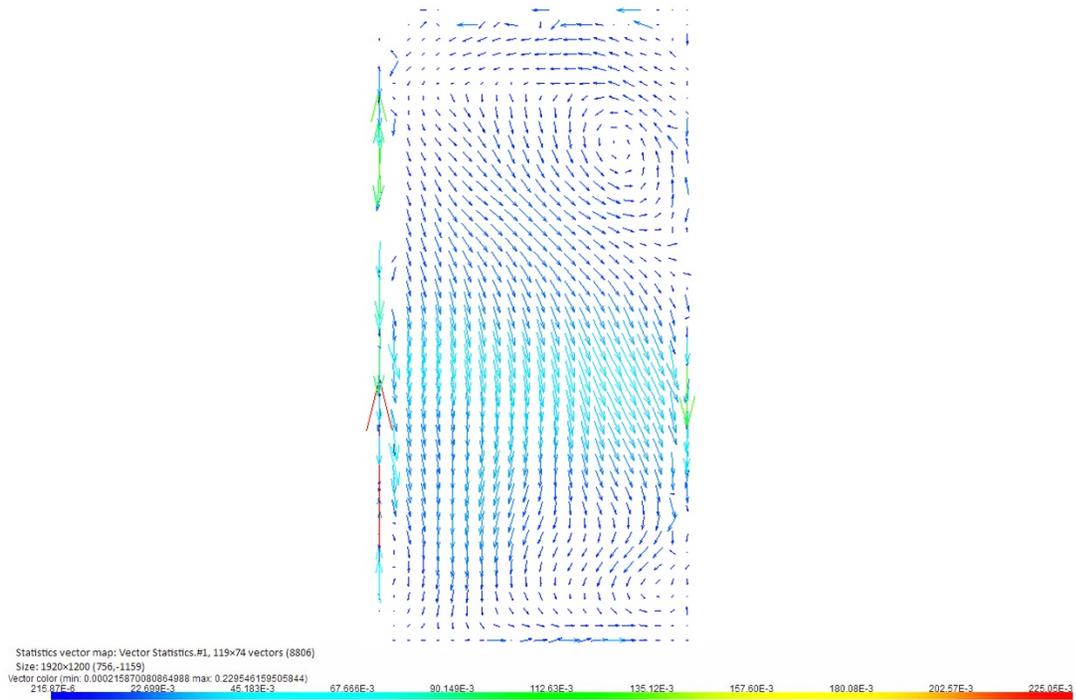


Figura 161. MEDIO 10 MM BAJO 200 rpm

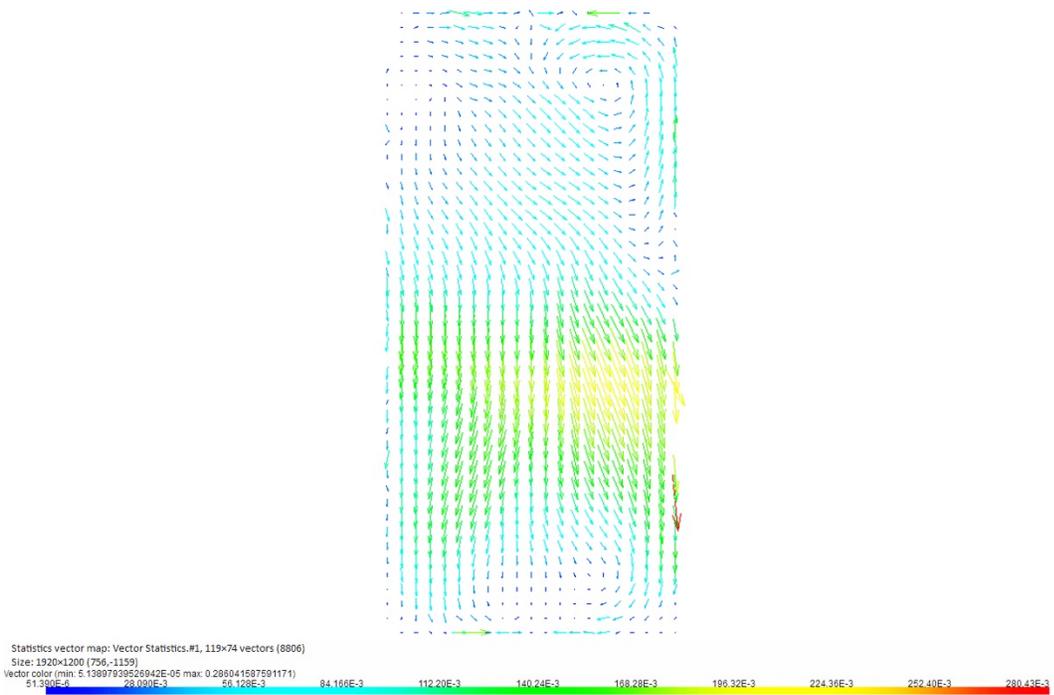


Figura 162. MEDIO 10 MM BAJO 600 rpm

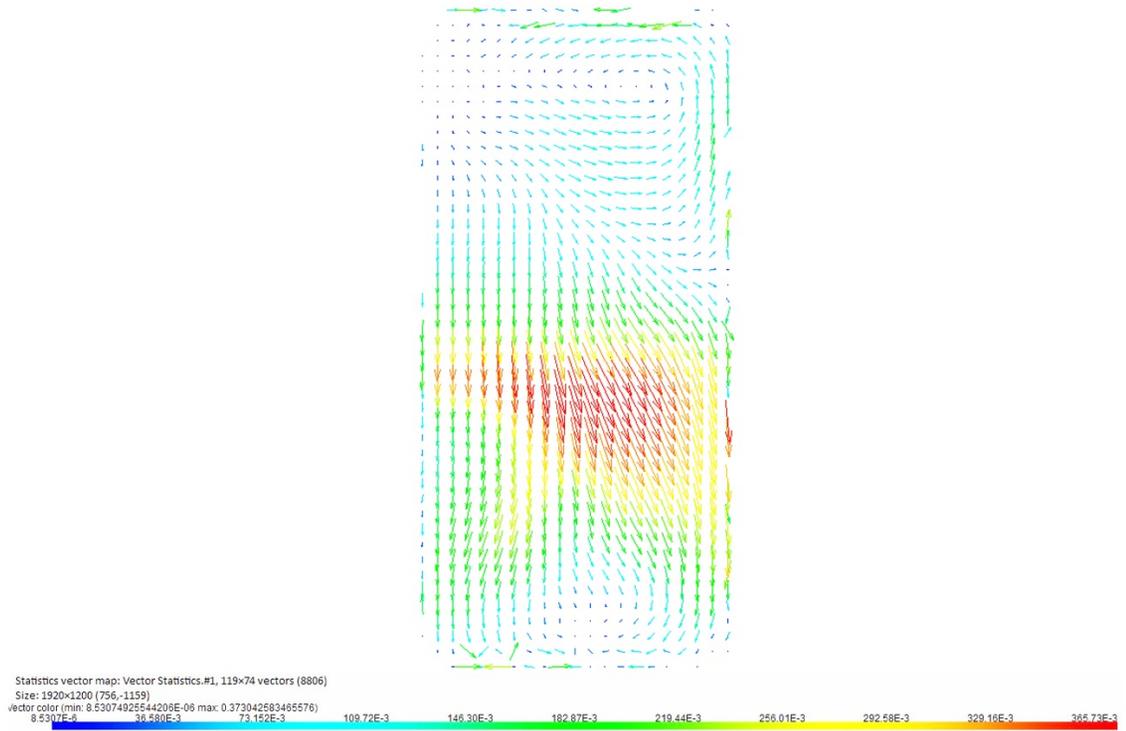


Figura 163. MEDIO 10 MM BAJO 1000 rpm

APENDICE D. IMÁGENES DE VECTORES EXPORTADAS POR ANSYS® FLUENT®

1. CORTE PROPELA 1 MM BAJO

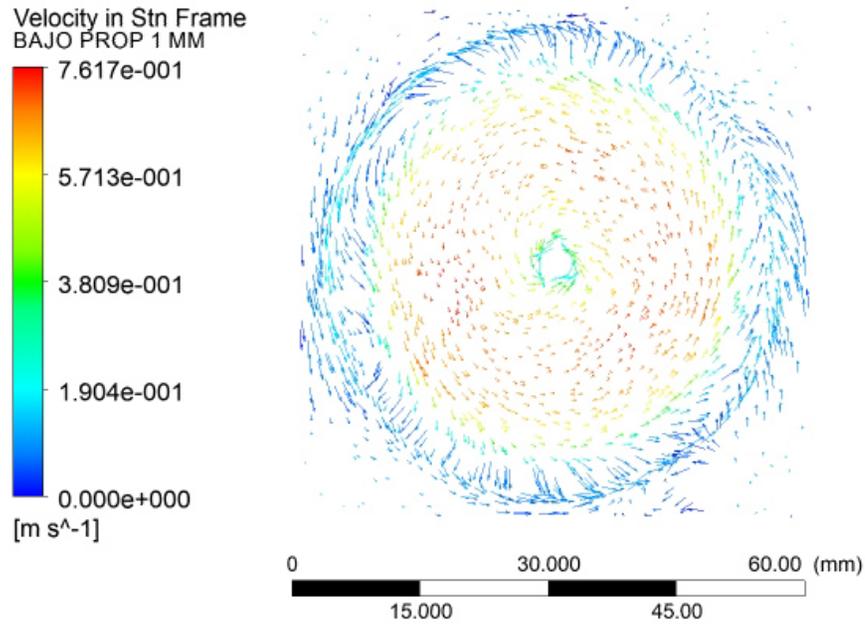


Figura 164. PROPELA 1MM BAJO en la ZONA 1 a 1000 rpm

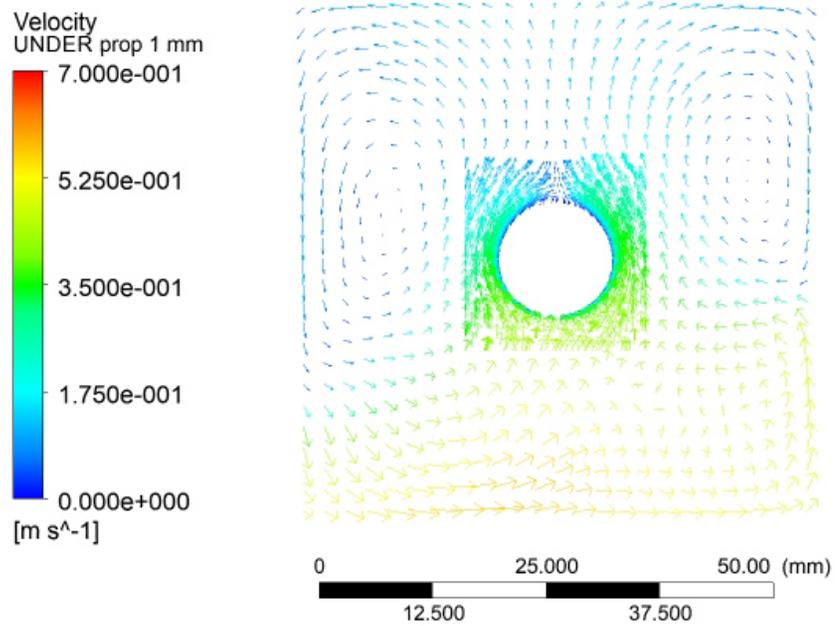


Figura 165. PROPELA 1MM BAJO en la ZONA 2 a 1000 rpm

2. CORTE BARRA 10 MM BAJO

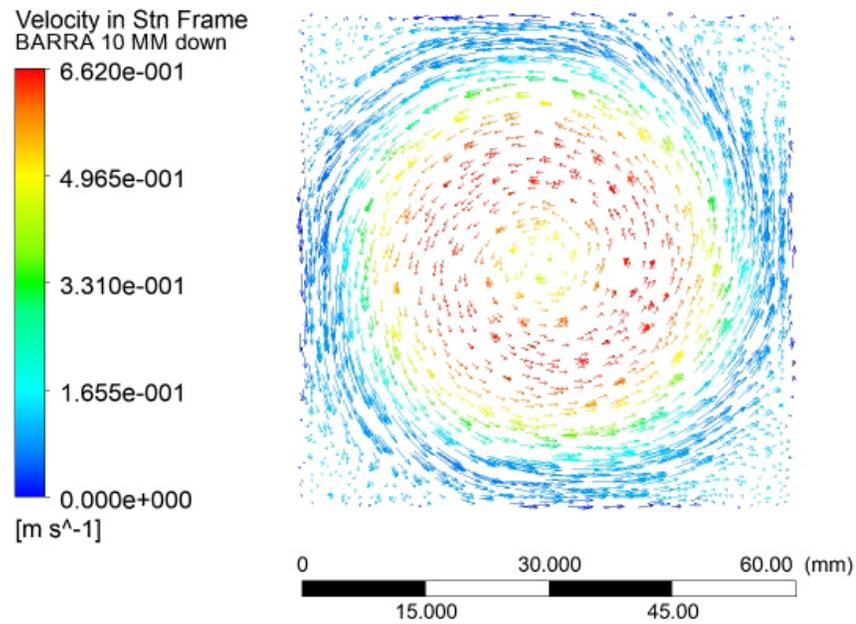


Figura 166. BARRA 10 MM BAJO en la ZONA 1 a 1000 rpm

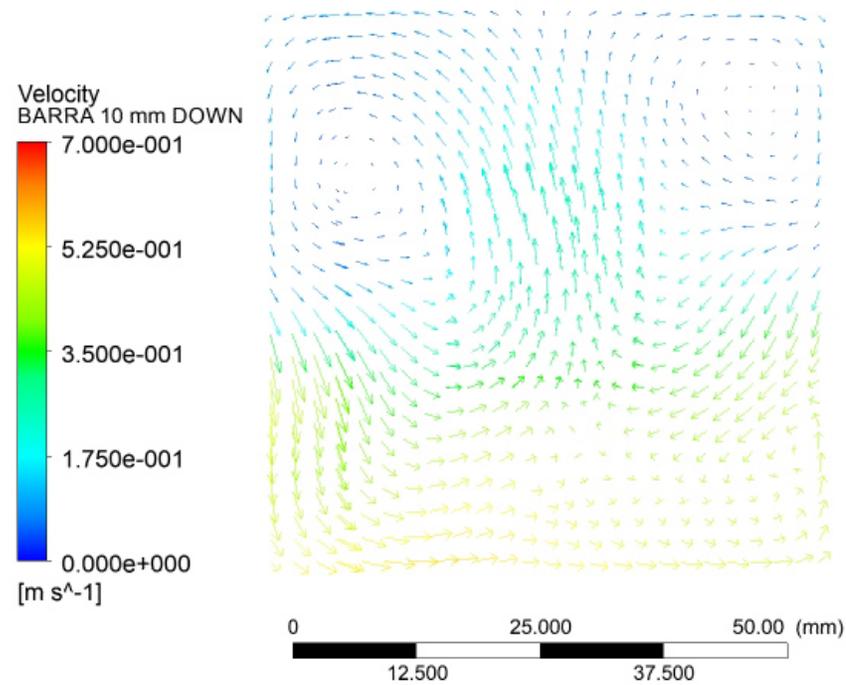


Figura 167. BARRA 10 MM BAJO en la ZONA 2 a 1000 rpm

3. CORTE BARRA 10 MM SOBRE

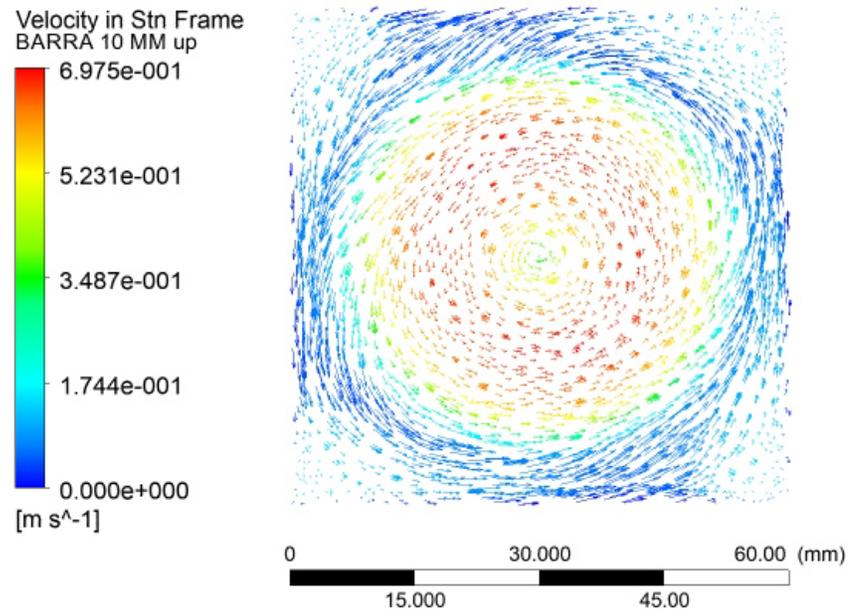


Figura 168. BARRA 10 MM SOBRE en la ZONA 1 a 1000 rpm

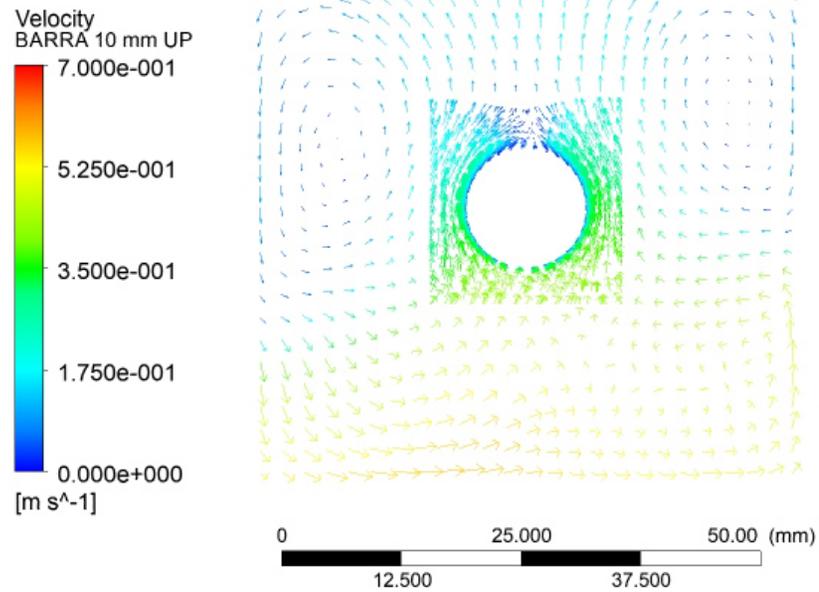


Figura 169. BARRA 10 MM SOBRE en la ZONA 2 a 1000 rpm

4. CORTE DER 10 MM

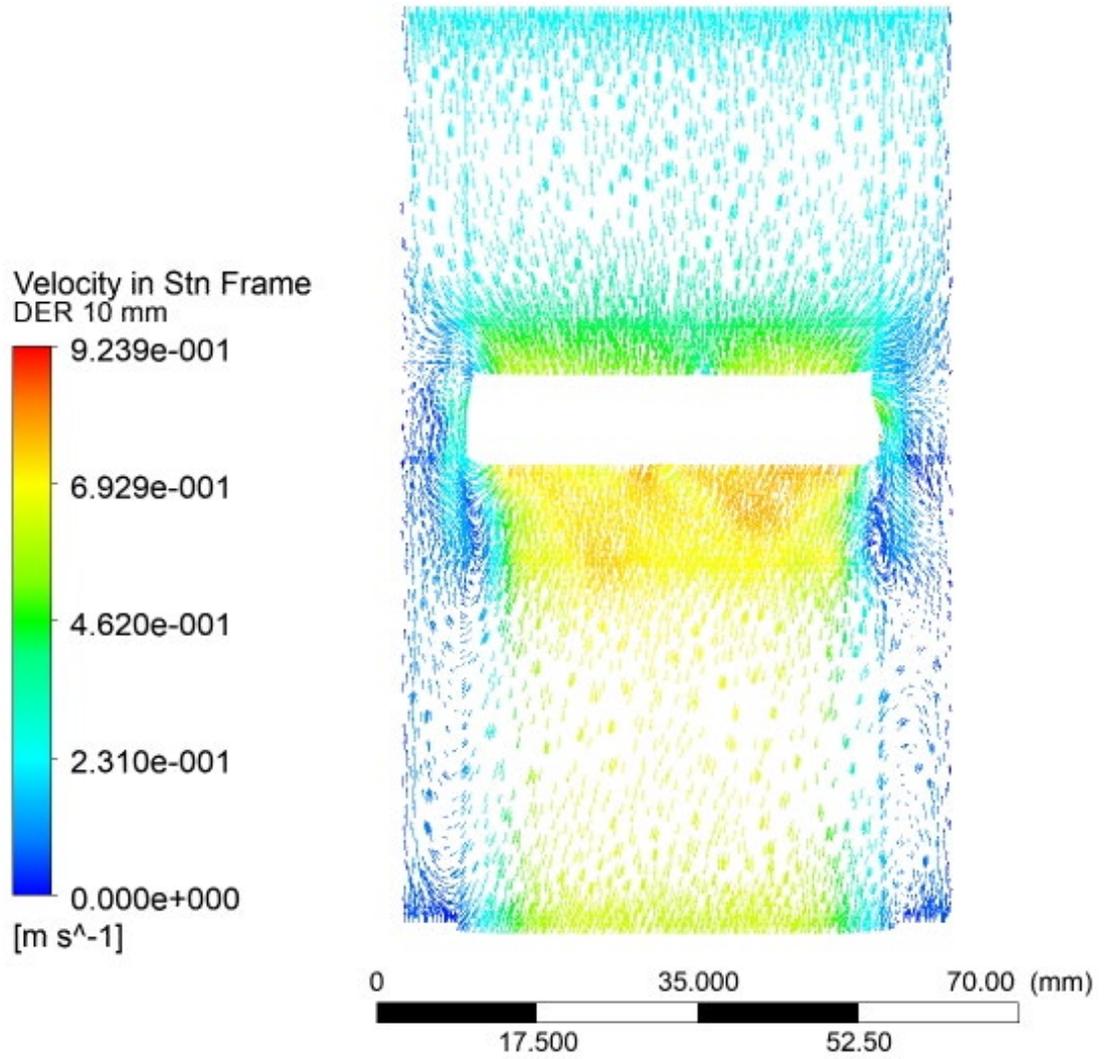


Figura 170. DER 10 MM en la ZONA 1 a 1000 rpm

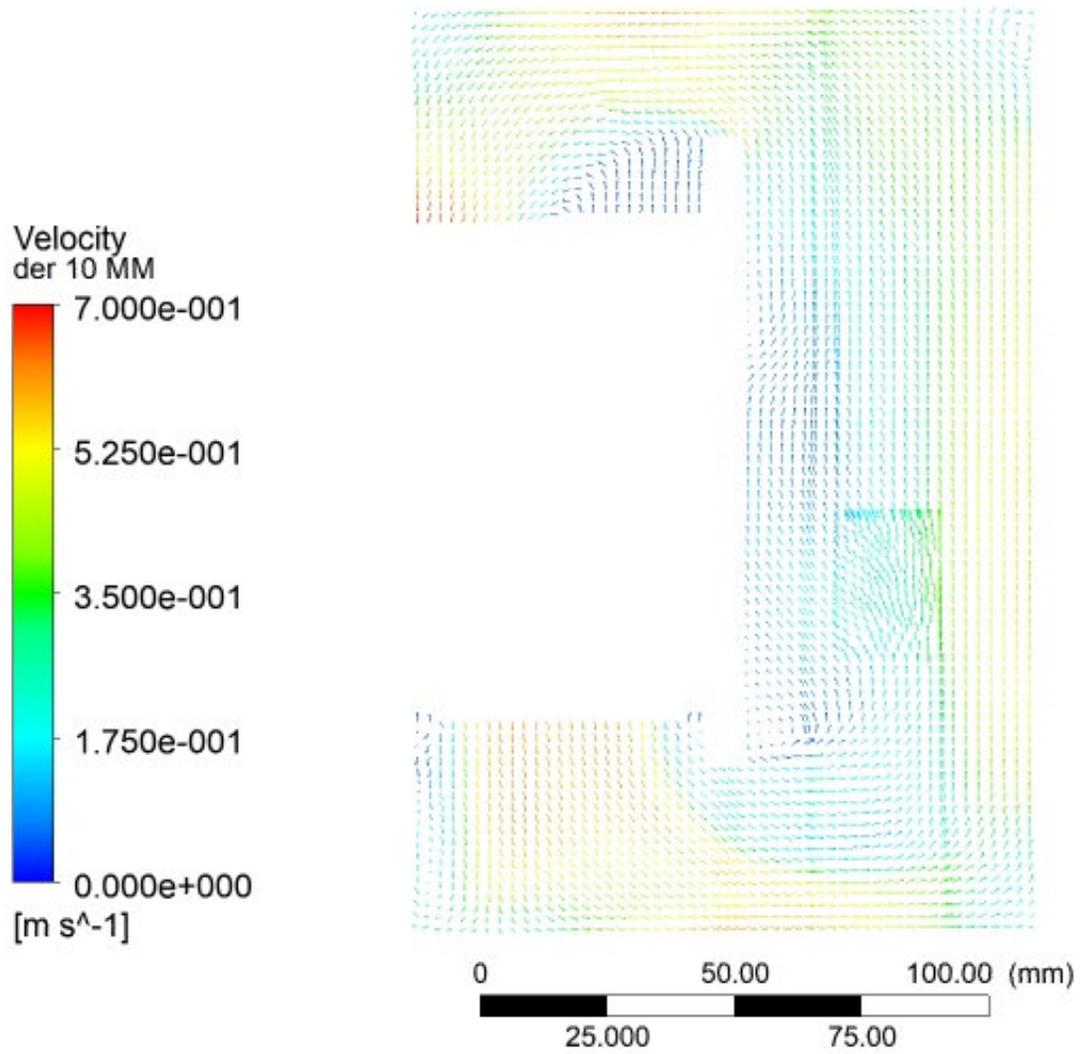


Figura 171. DER 10 MM en la ZONA 2 a 1000 rpm

5. CORTE DER CENT

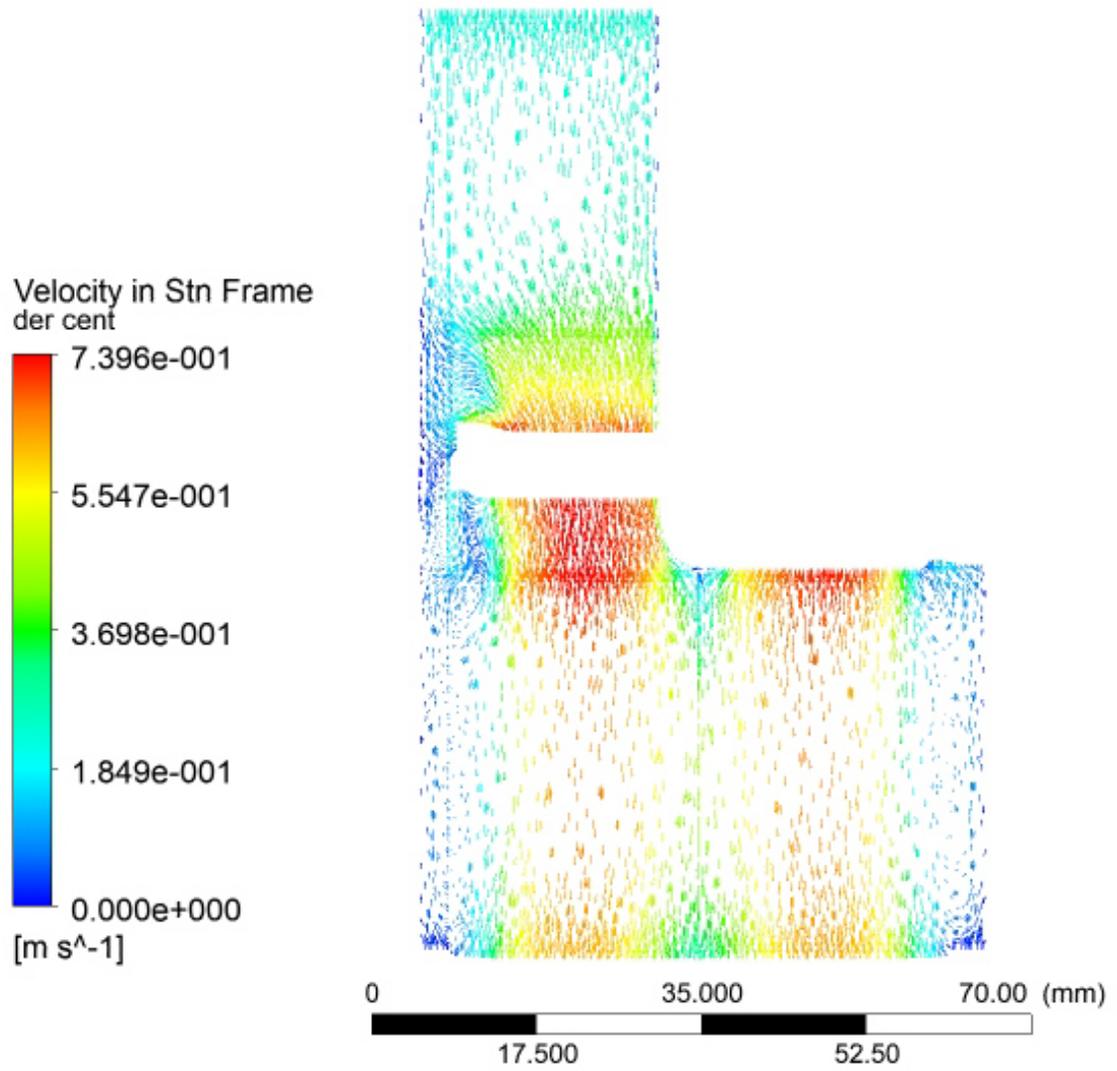


Figura 172. DER CENT en la ZONA 1 a 1000 rpm

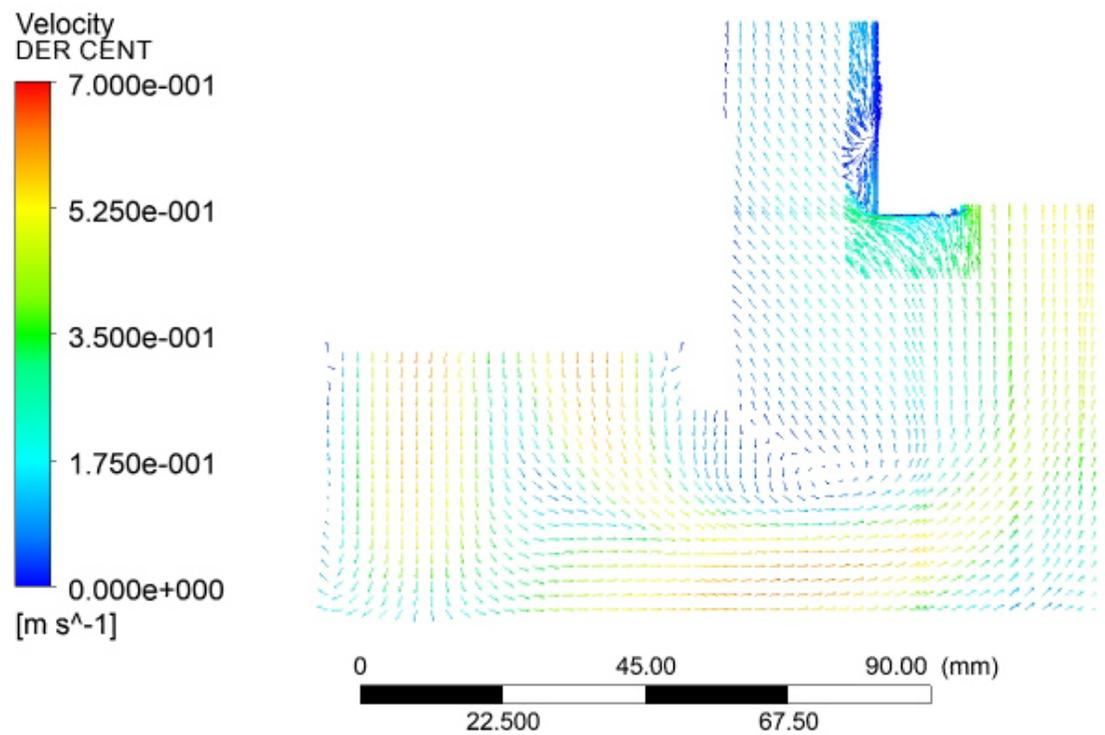


Figura 173. DER CENT en la ZONA 2 a 1000 rpm

6. CORTE IZQ 10 MM

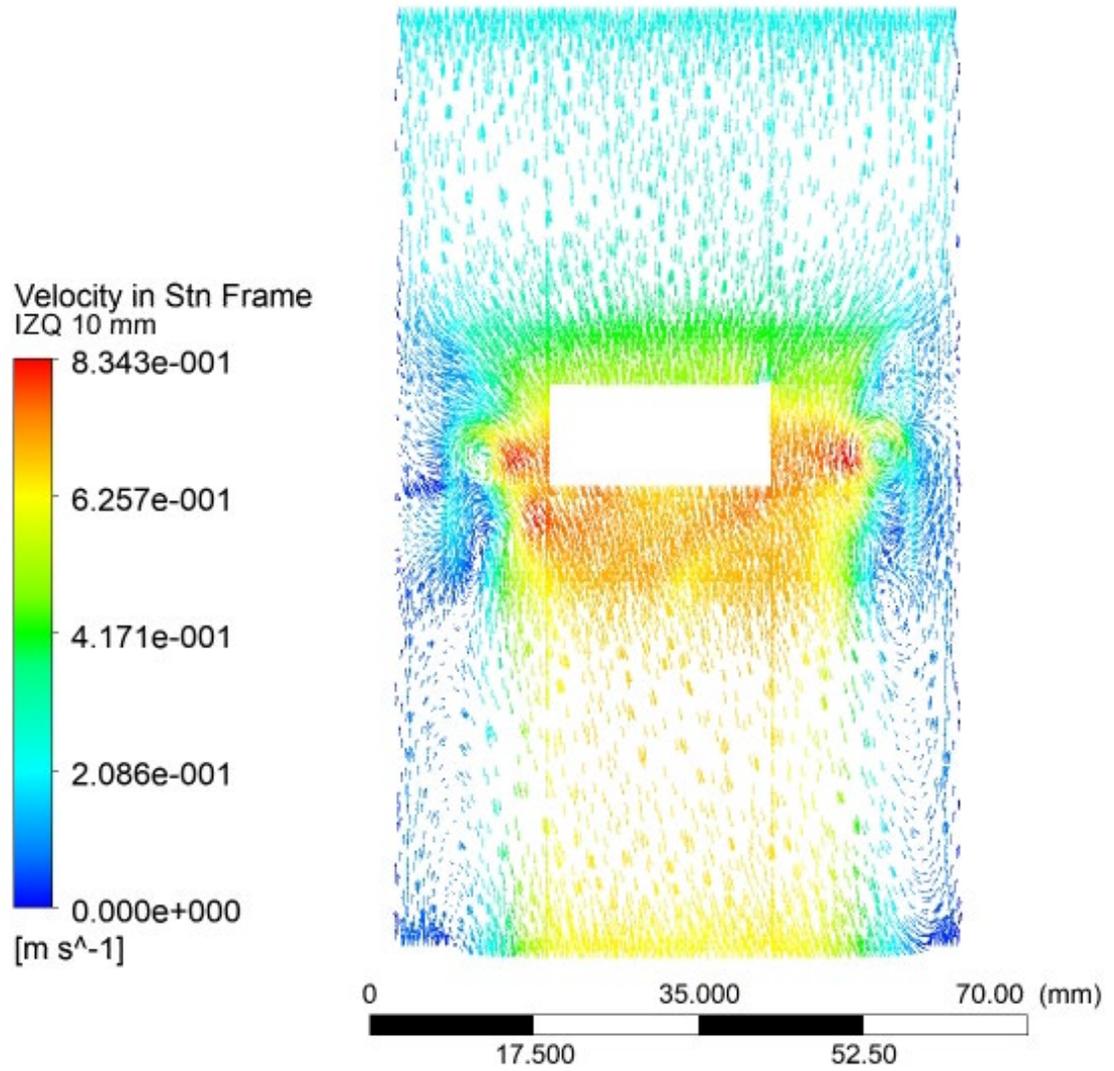


Figura 174. IZQ 10 MM en la ZONA 1 a 1000 rpm

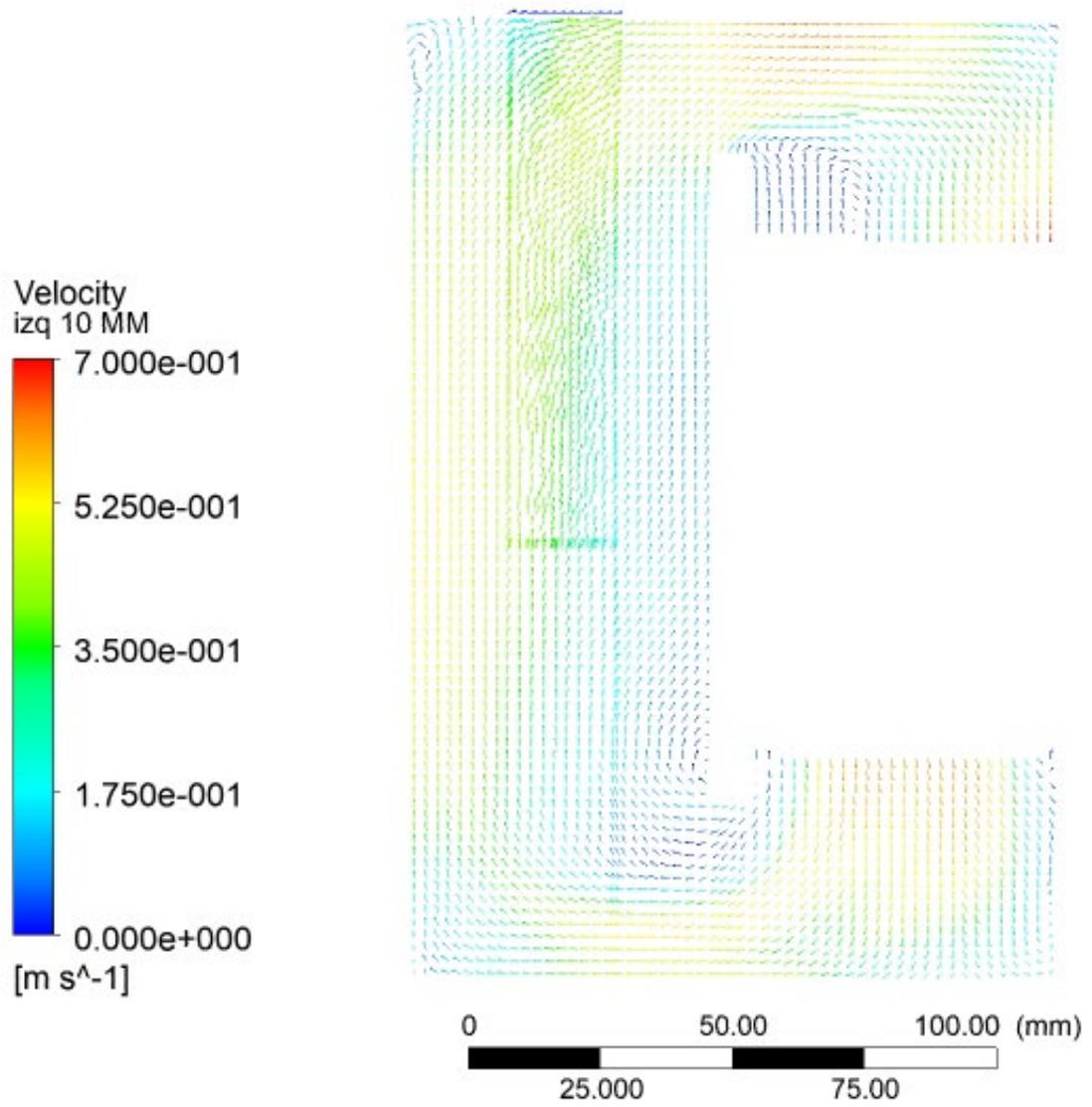


Figura 175. IZQ 10 MM en la ZONA 2 a 1000 rpm

7. CORTE IZQ CENT

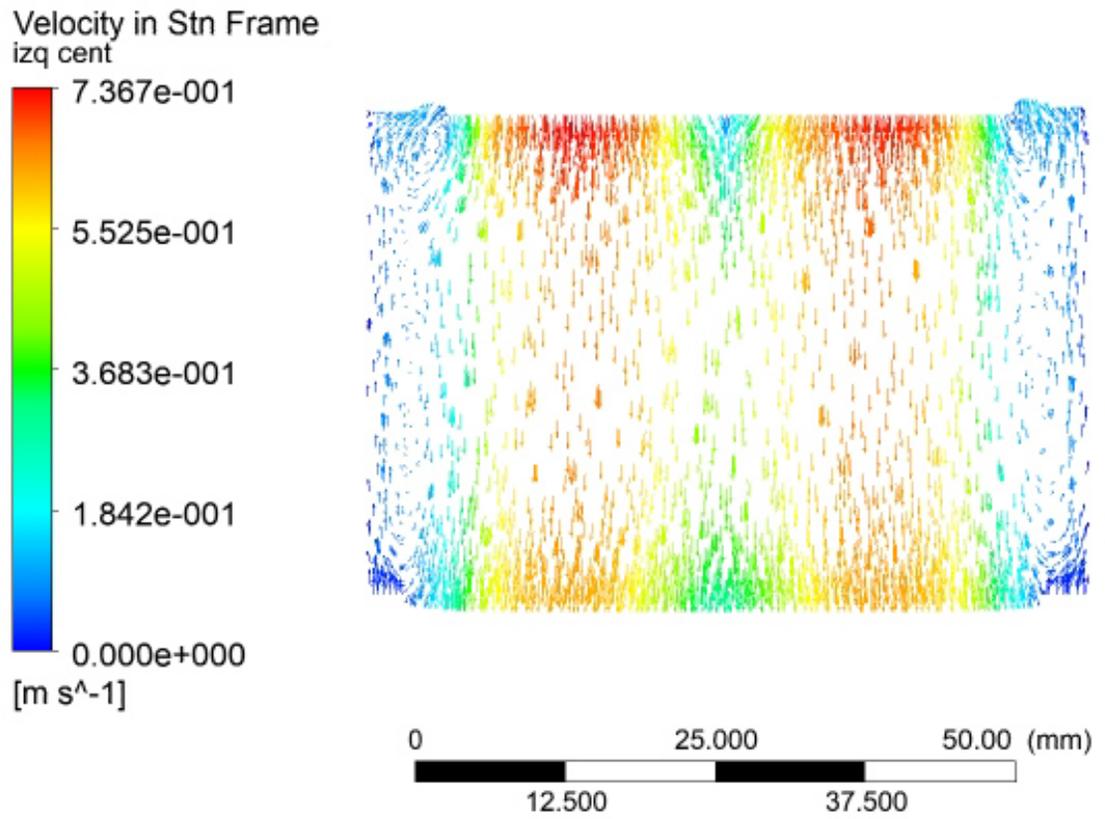


Figura 176. IZQ CENT en la ZONA 1 a 1000 rpm

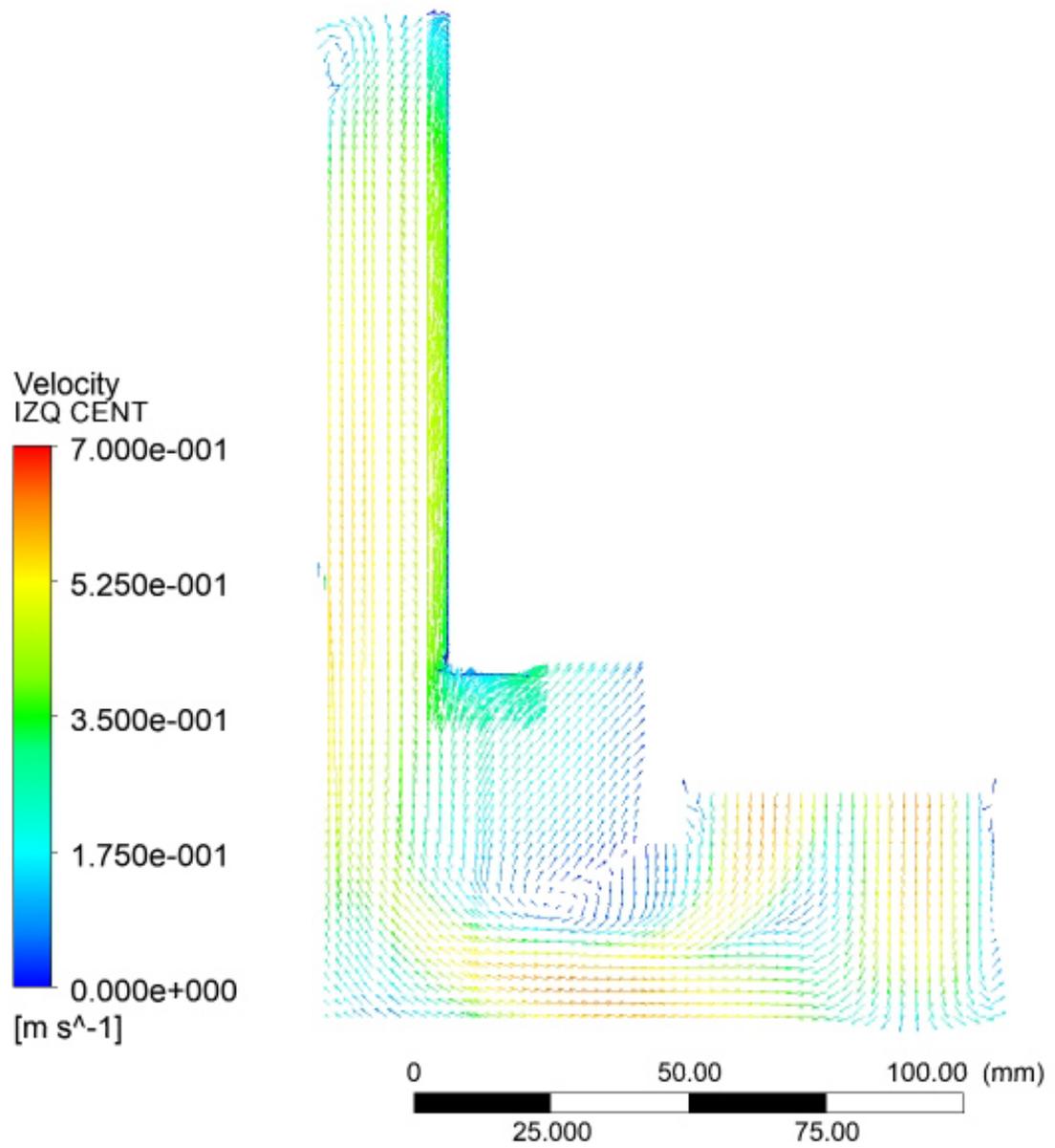


Figura 177. IZQ CENT en la ZONA 2 a 1000 rpm

8. CORTE MEDIO 10 MM SOBRE

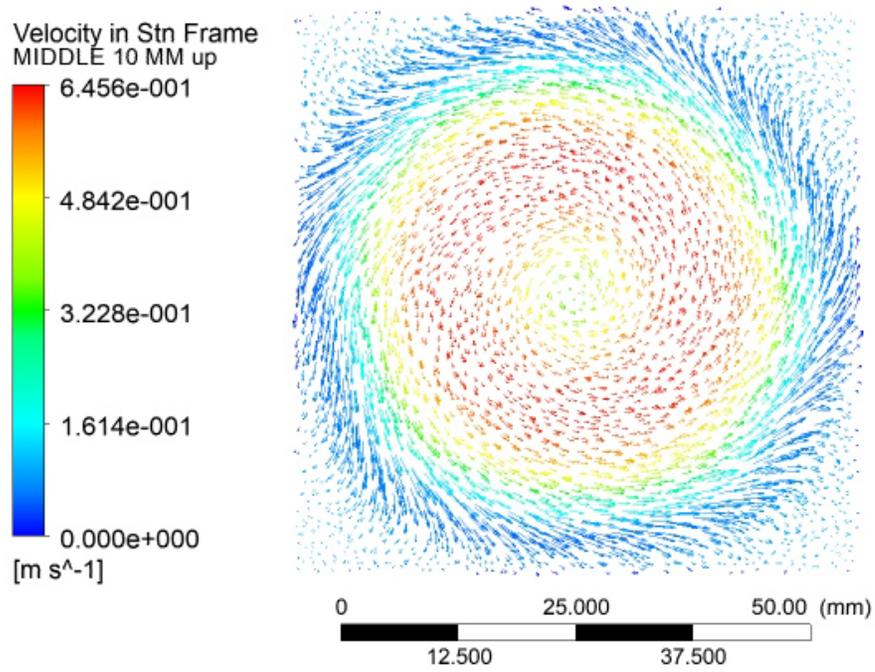


Figura 178. MEDIO 10 MM SOBRE en la ZONA 1 a 1000 rpm

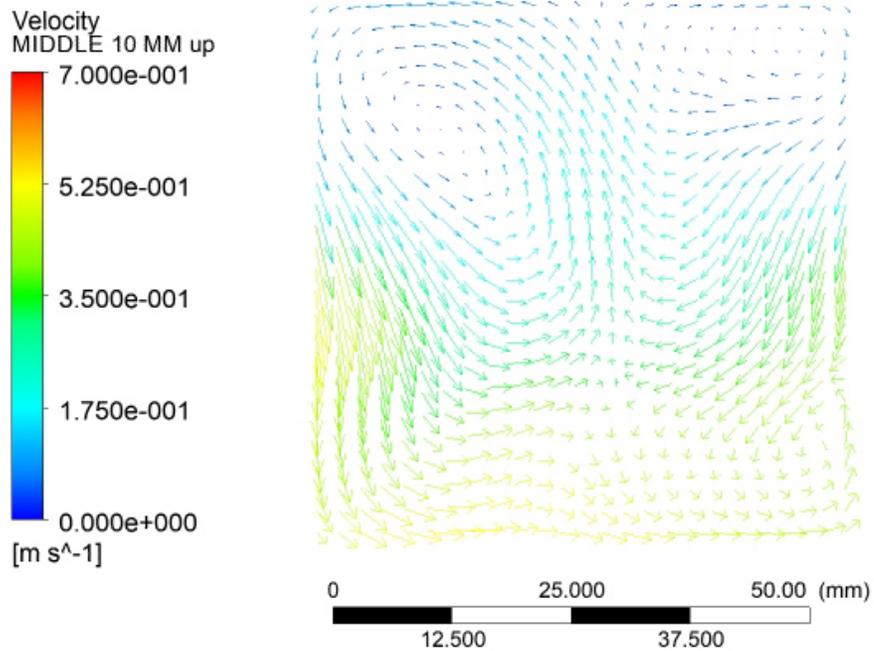


Figura 179. MEDIO 10 MM SOBRE en la ZONA 2 a 1000 rpm

9. CORTE MEDIO 10 MM BAJO

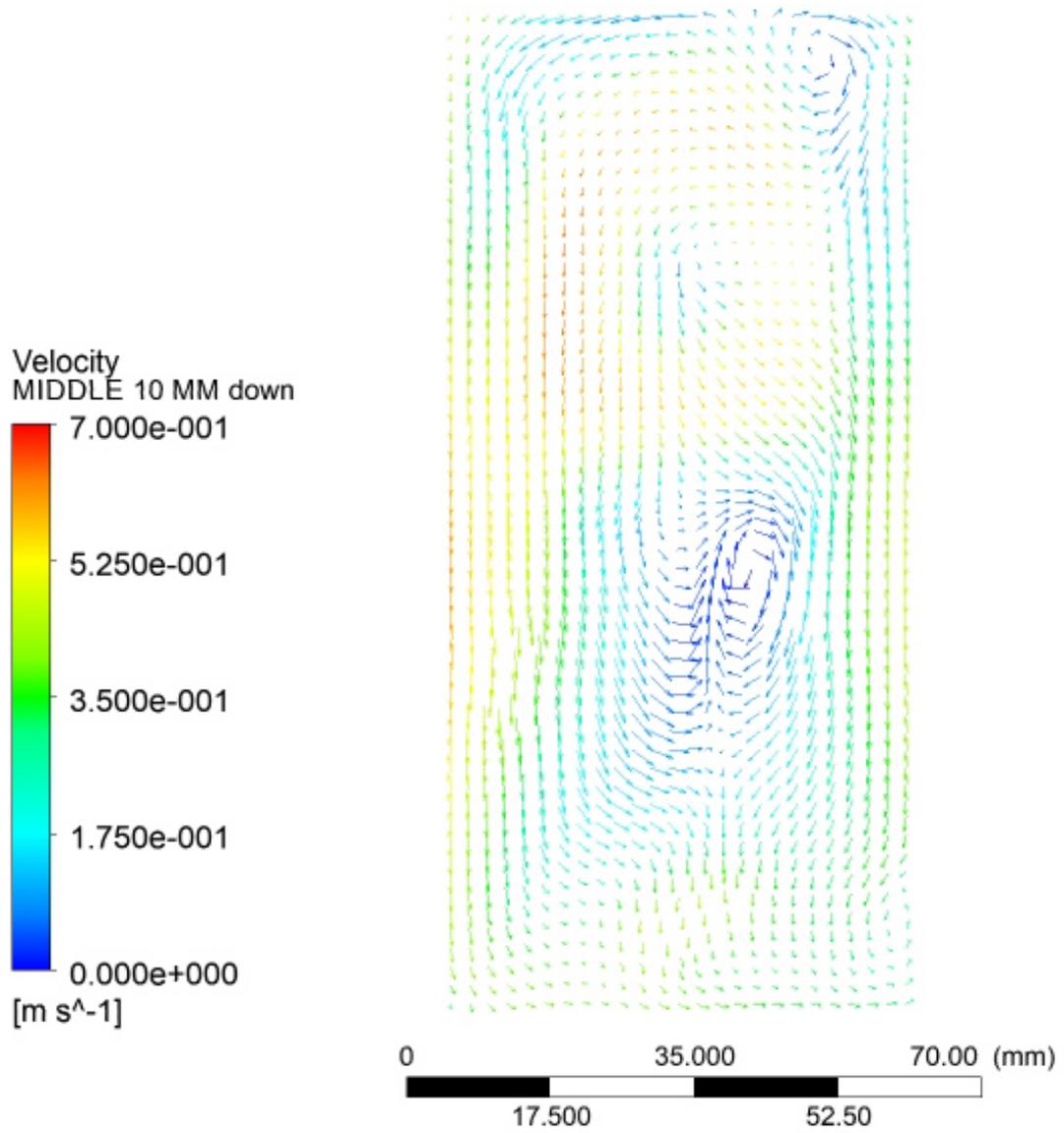


Figura 180. MEDIO 10 MM BAJO en la ZONA 2 a 1000 rpm

APENDICE E. CONTORNOS DE VELOCIDAD CREADOS CON MATLAB®

1. CORTE PROPELA 1 MM BAJO

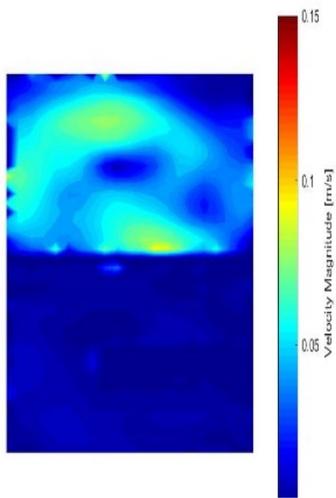


Figura 181. 200 rpm

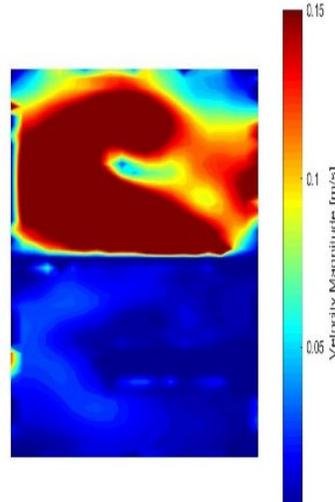


Figura 182. 600 rpm

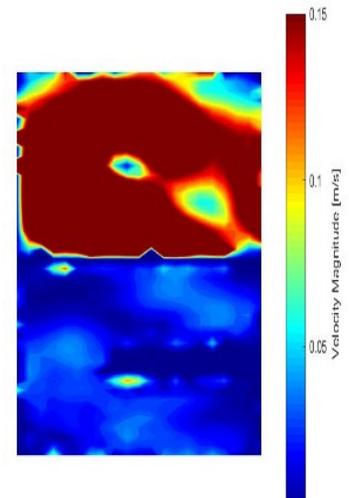


Figura 183. 1000 rpm

2. CORTE BARRA 10 MM BAJO

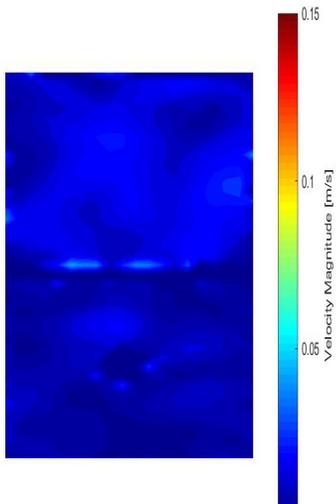


Figura 184. 200 rpm

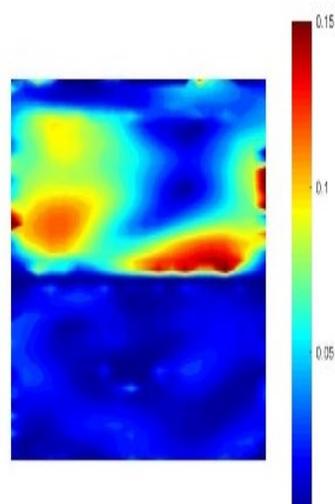


Figura 185. 600 rpm

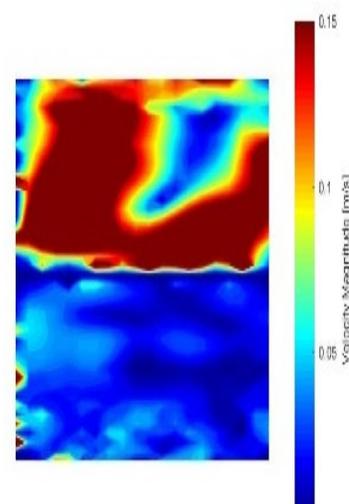


Figura 186. 1000 rpm

3. CORTE BARRA 10 MM SOBRE

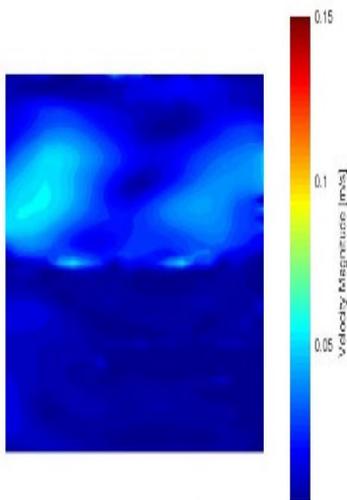


Figura 187. 200 rpm

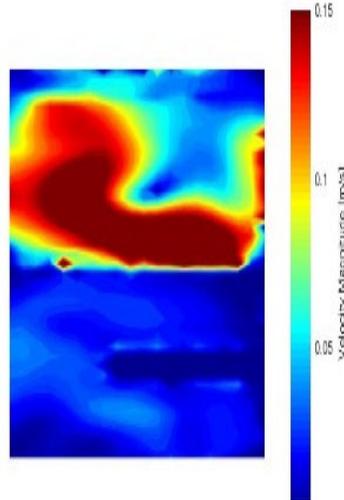


Figura 188. 600 rpm

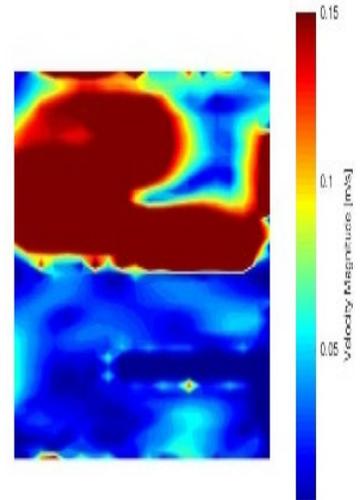


Figura 189. 1000 rpm

4. CORTE DER 10 MM

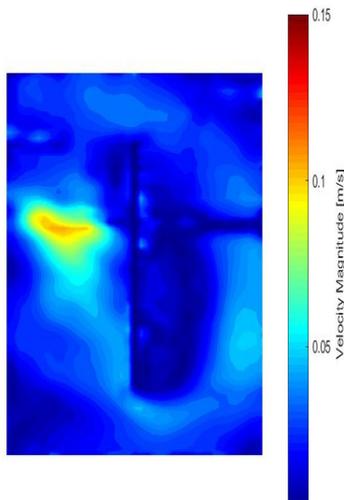


Figura 190. 200 rpm

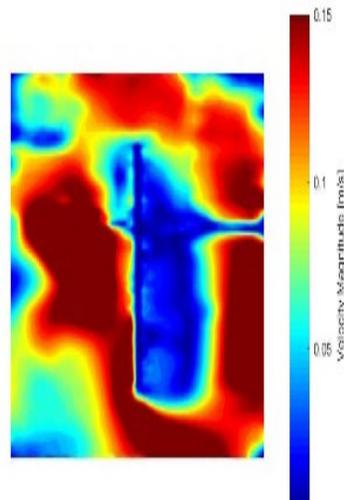


Figura 191. 600 rpm

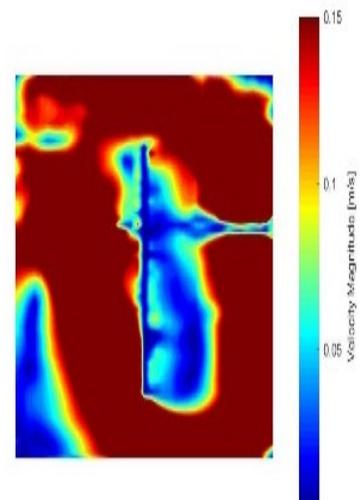


Figura 192. 1000 rpm

5. CORTE DER CENT

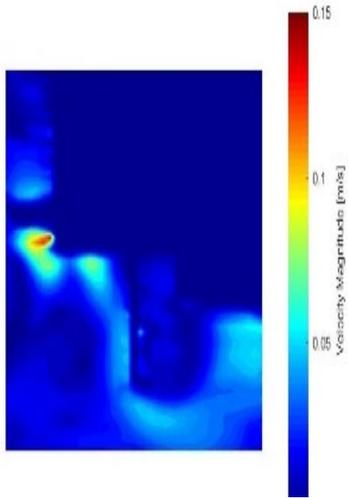


Figura 193. 200 rpm

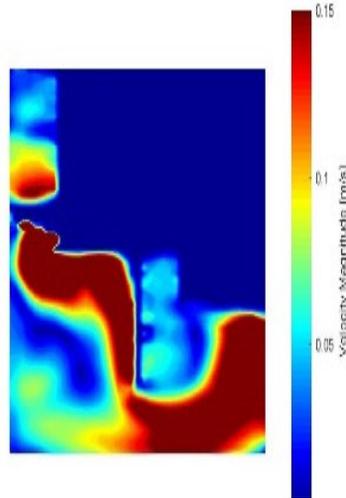


Figura 194. 600 rpm

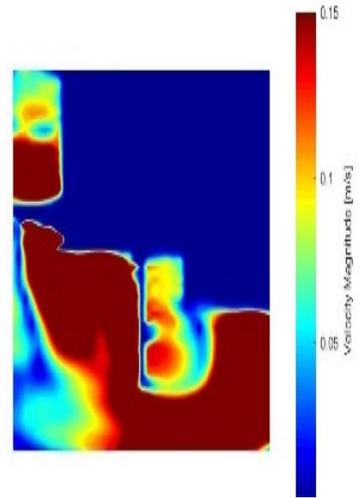


Figura 195. 1000 rpm

6. CORTE IZQ 10 MM

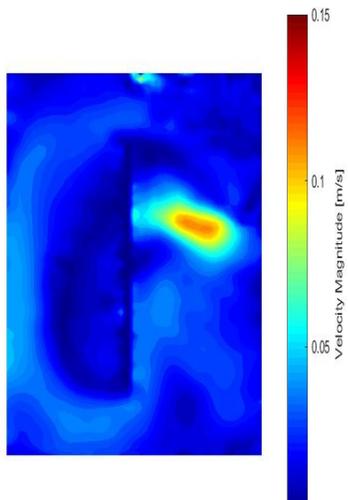


Figura 196. 200 rpm

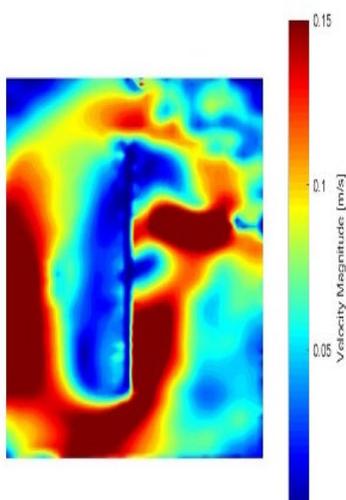


Figura 197. 600 rpm

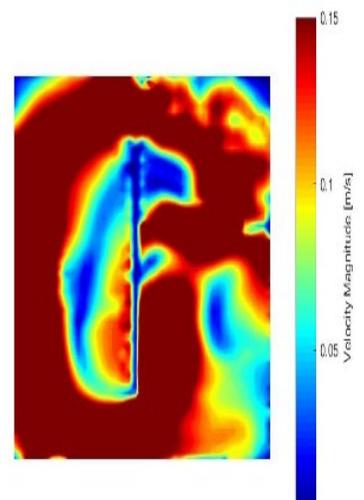


Figura 198. 1000 rpm

7. CORTE IZQ CENT

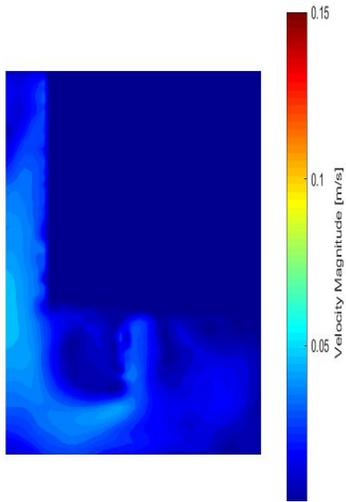


Figura 199. 200 rpm

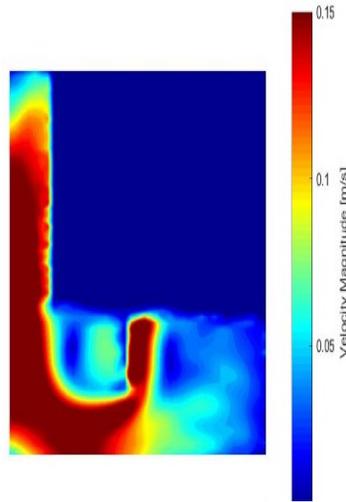


Figura 200. 600 rpm

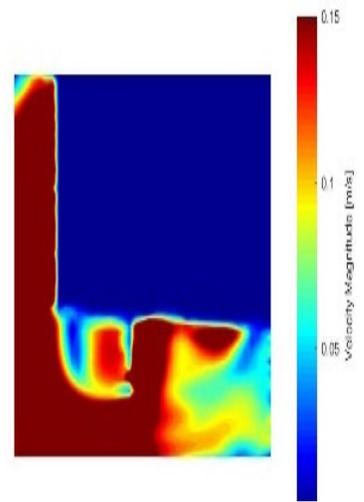


Figura 201. 1000 rpm

8. CORTE MEDIO 10 MM BAJO

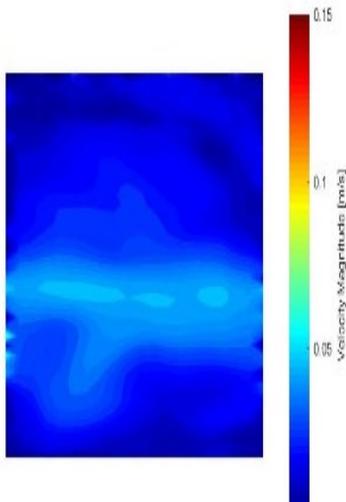


Figura 202. 200 rpm

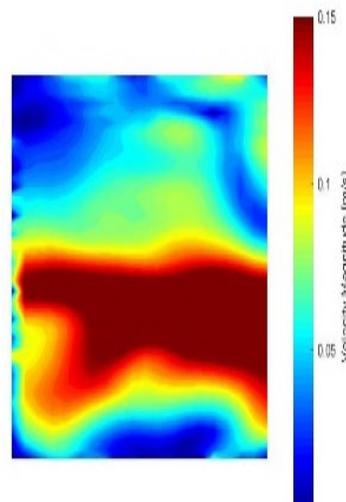


Figura 203. 600 rpm

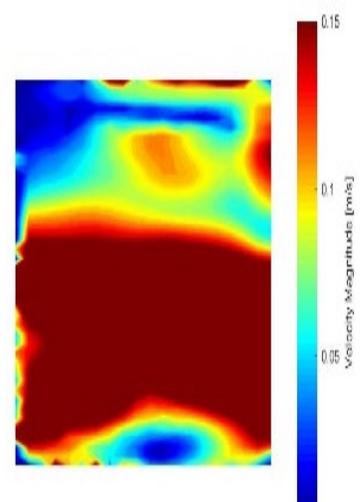


Figura 204. 1000 rpm

9. CORTE MEDIO 10 MM SOBRE

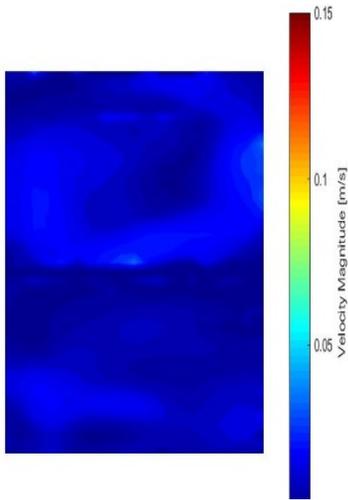


Figura 205. 200 rpm

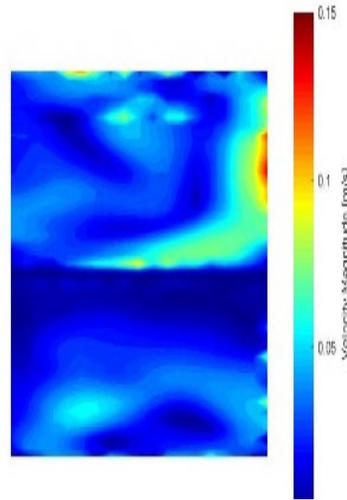


Figura 206. 600 rpm

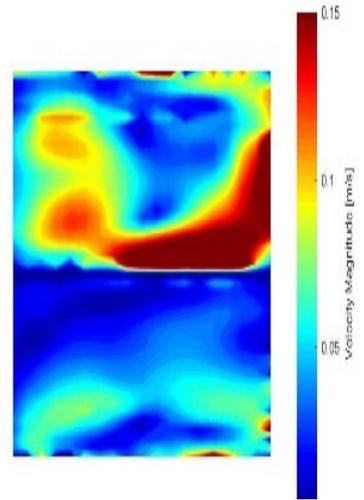


Figura 207. 1000 rpm

APENDICE F. CONTORNOS DE VELOCIDAD EXPORTADOS POR ANSYS® FLUENT®

1. ZONA 1 A 1000 RPM

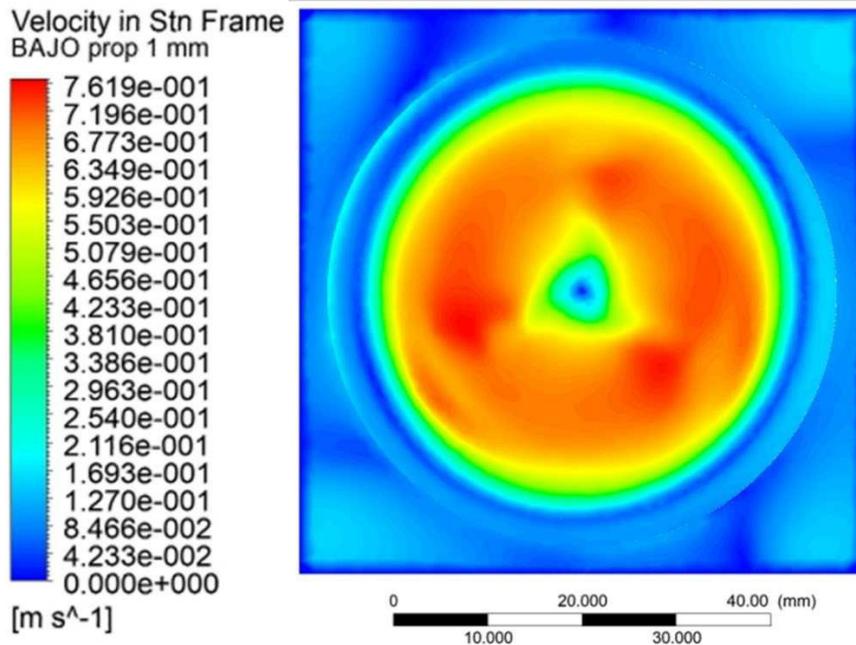


Figura 208. PROPELA 1 MM BAJO 1000 rpm

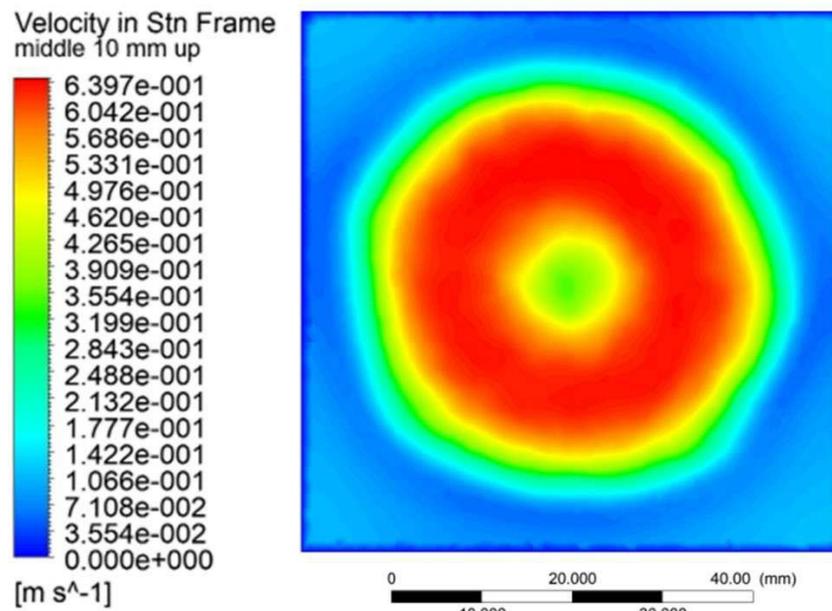


Figura 209. MEDIO 10 MM SOBRE 1000 rpm

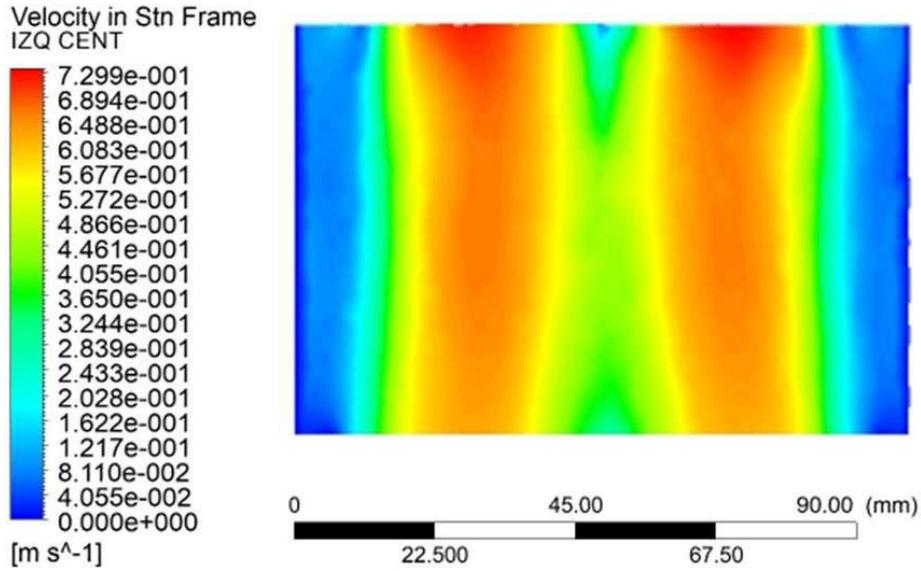


Figura 210. IZQ CENT 1000 rpm

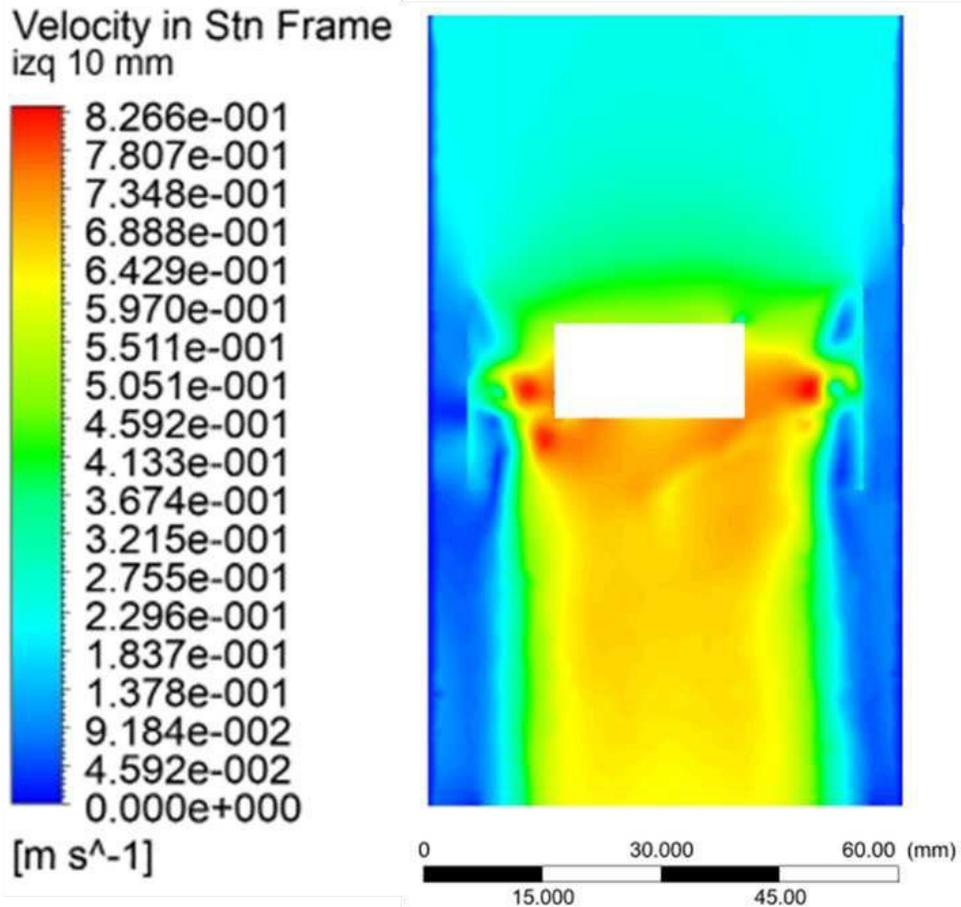


Figura 211. IZQ 10 MM 1000 rpm

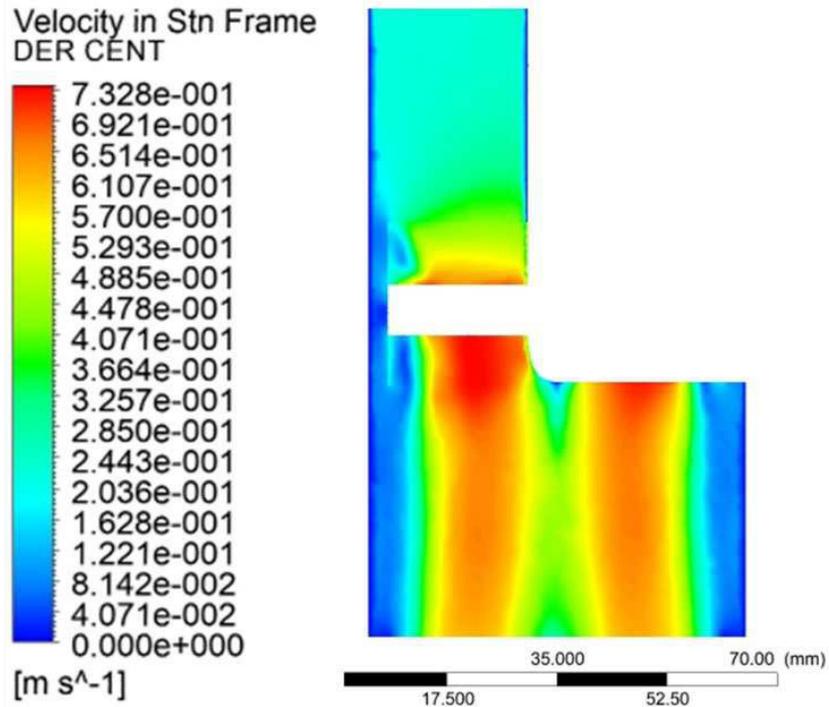


Figura 212. DER CENT 1000 rpm

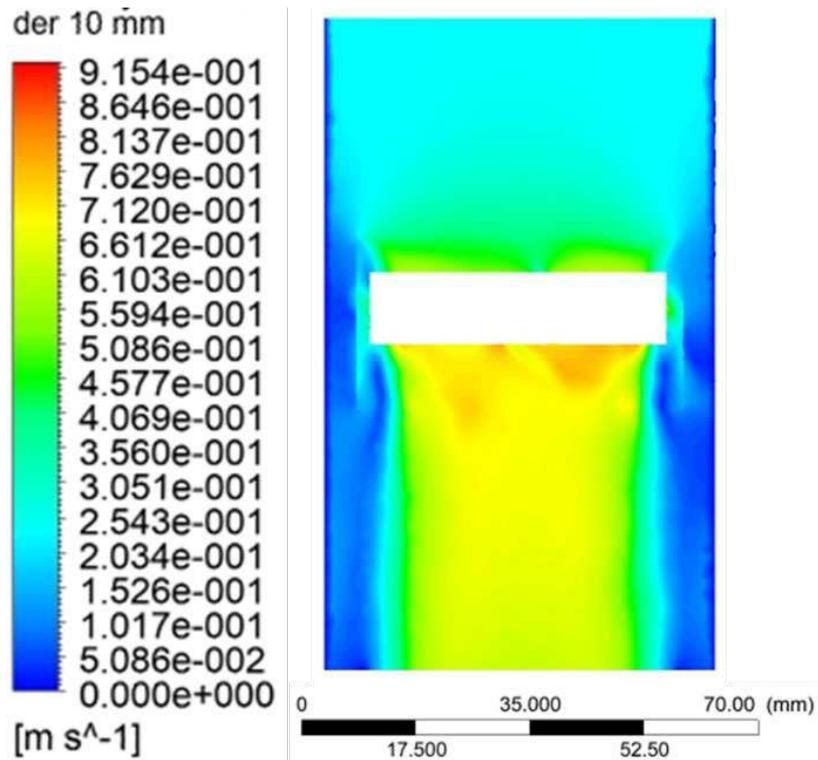


Figura 213. DER 10 MM 1000 rpm

Velocity in Stn Frame
barra 10 mm up

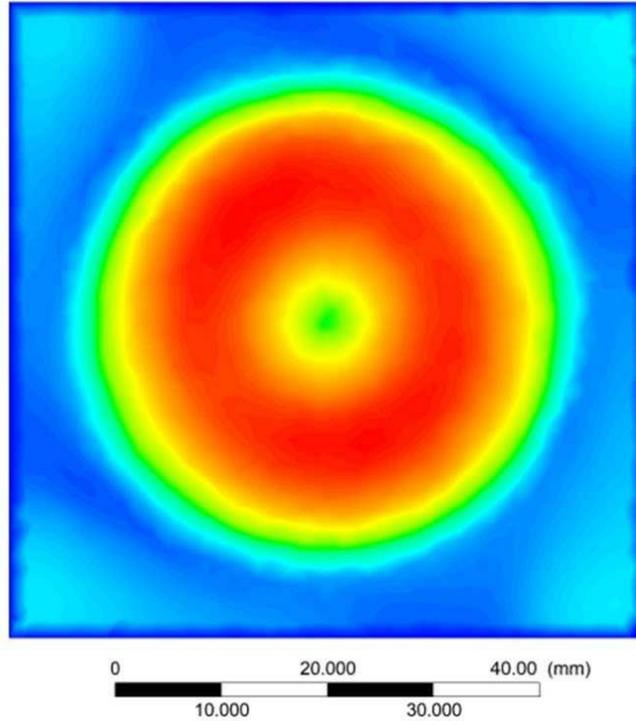
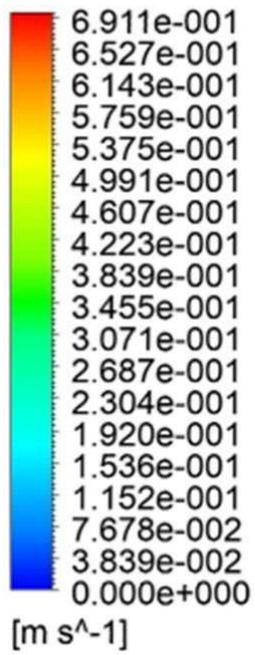


Figura 214. BARRA 10 MM SOBRE

Velocity in Stn Frame
barra 10 mm down

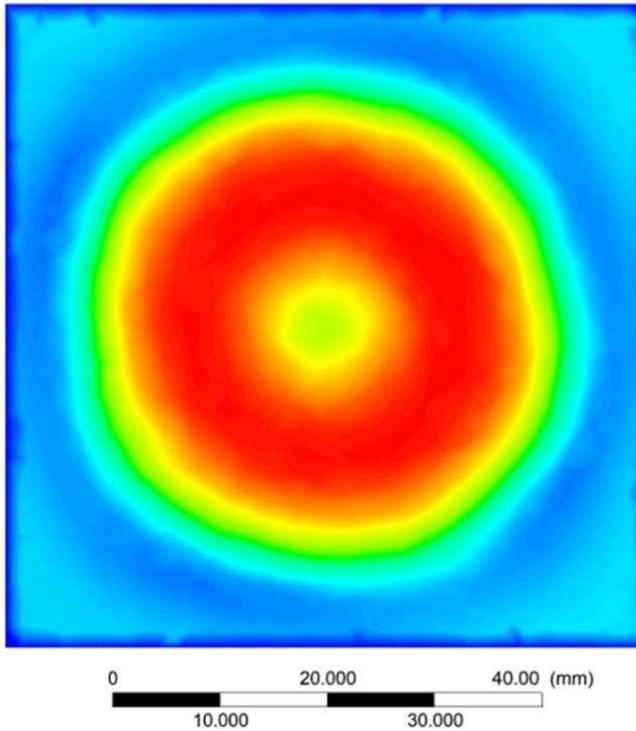
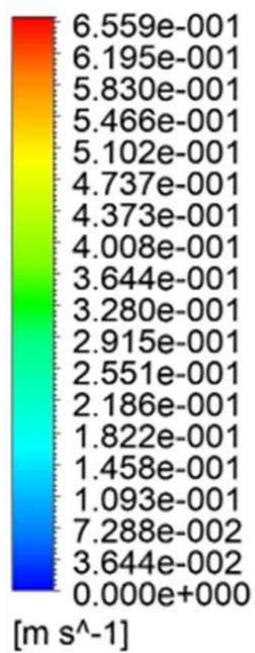


Figura 215. BARRA 10 MM BAJO 1000 rpm

2. ZONA 2 A 1000 RPM

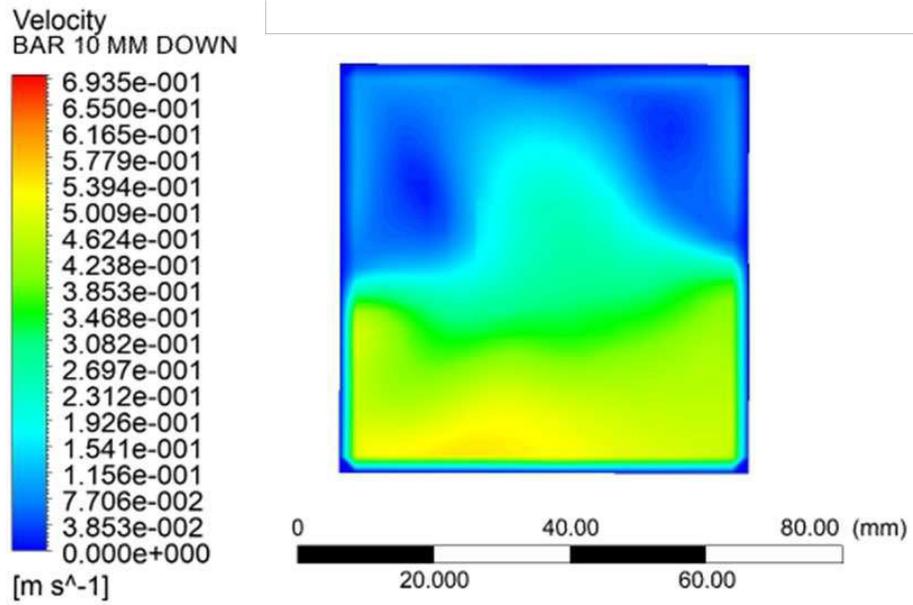


Figura 216. BARRA 10 MM BAJO 1000 rpm

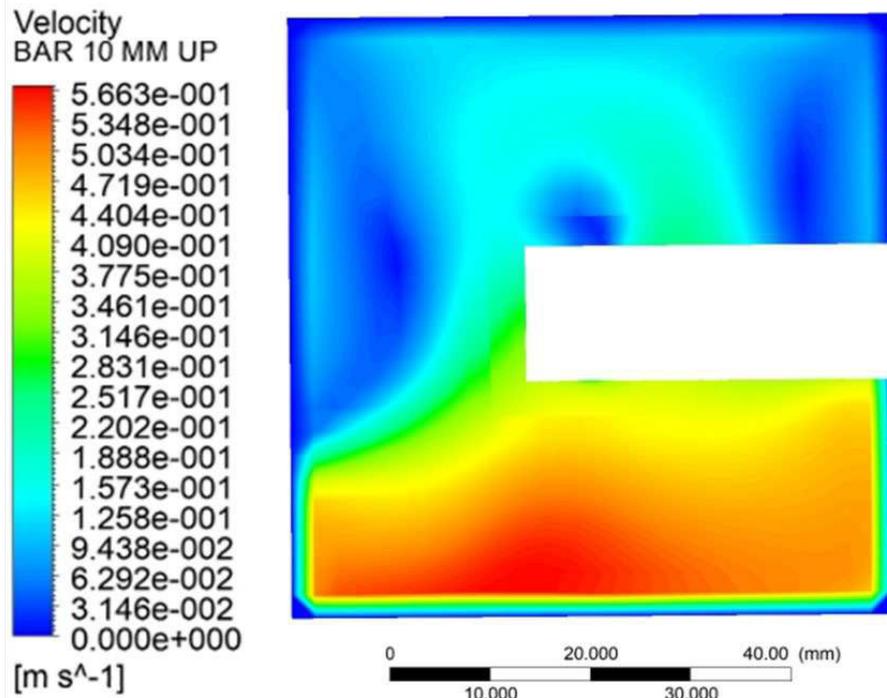


Figura 217. BARRA 10 MM SOBRE 1000 rpm

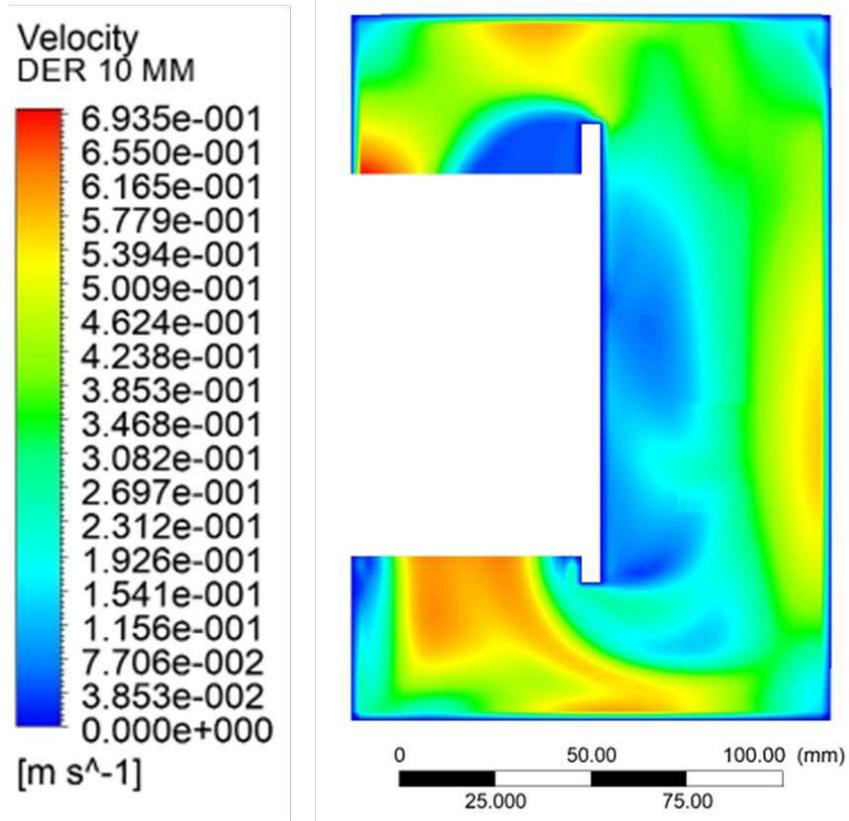


Figura 218. DER 10 MM 1000 rpm

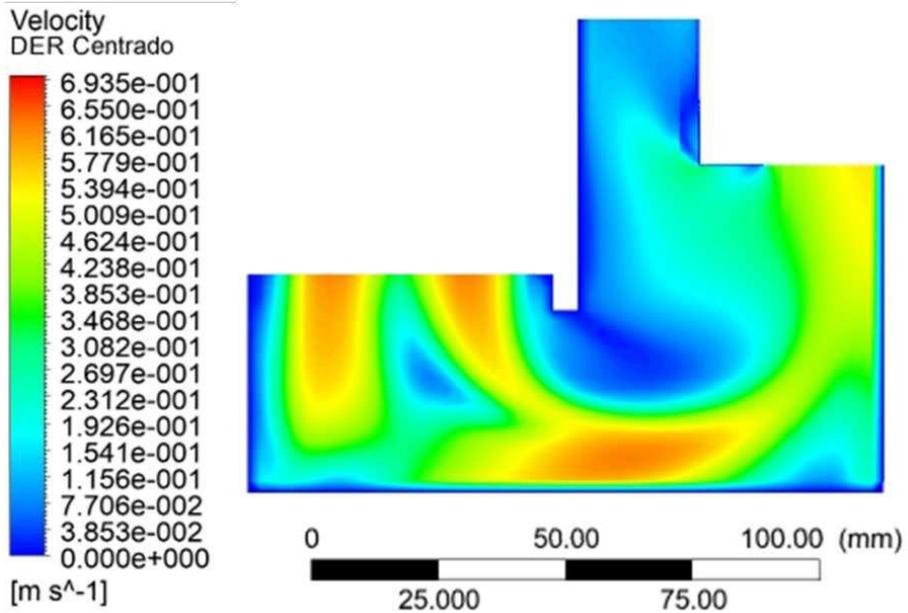


Figura 219. DER CENT 1000 rpm

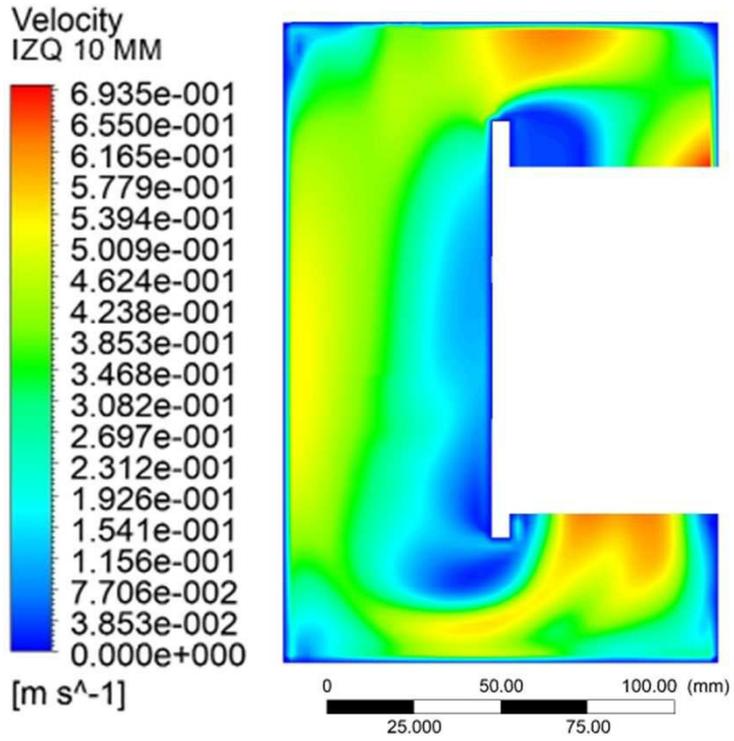


Figura 220. IZQ 10 MM 1000 rpm

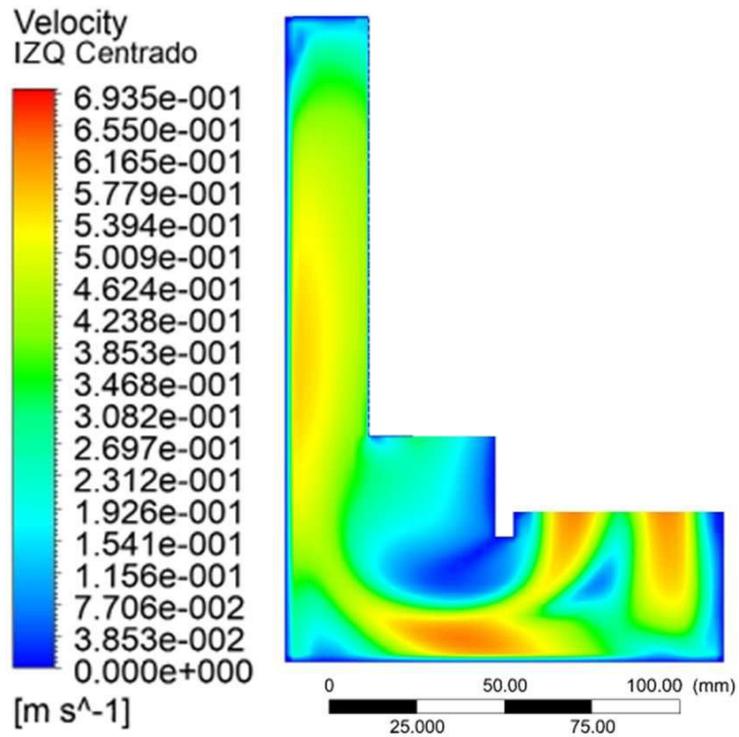


Figura 221. IZQ CENT 1000 rpm

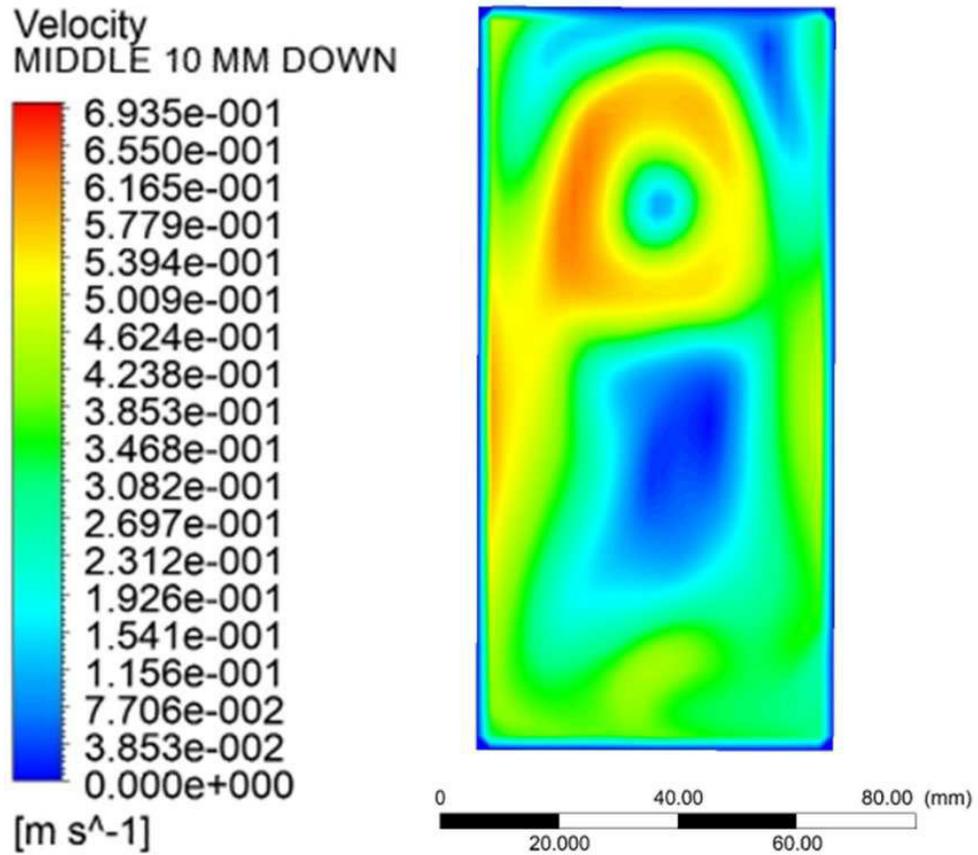


Figura 222. MEDIO 10 MM BAJO 1000 rpm

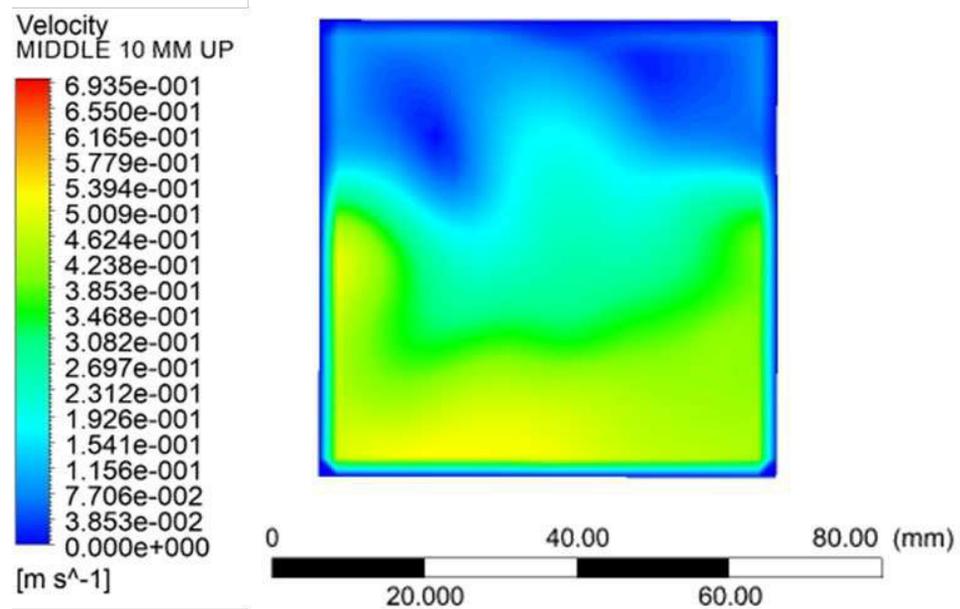


Figura 223. MEDIO 10 MM SOBRE 1000 rpm

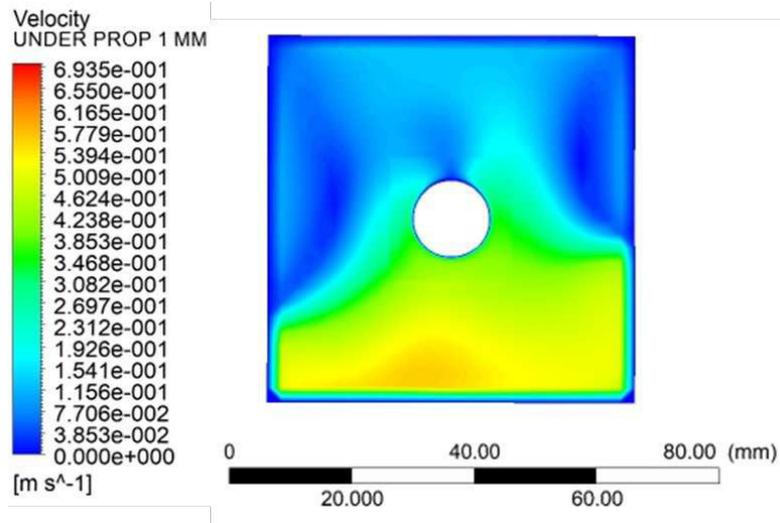


Figura 224. PROPELA 1 MM BAJO 1000 rpm

3. ZONA 2 A 600 RPM

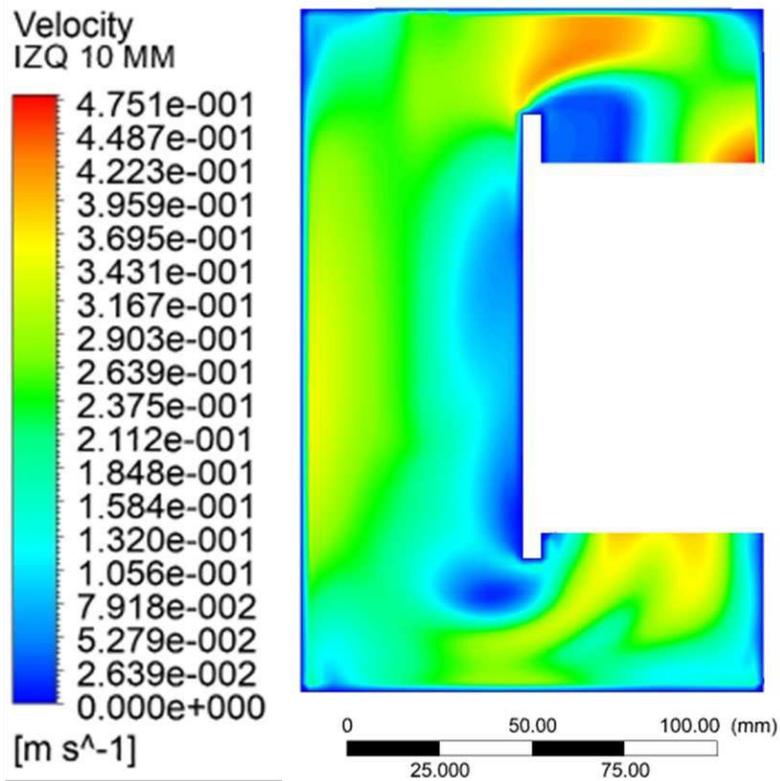


Figura 225. IZQ 10 MM 600 rpm

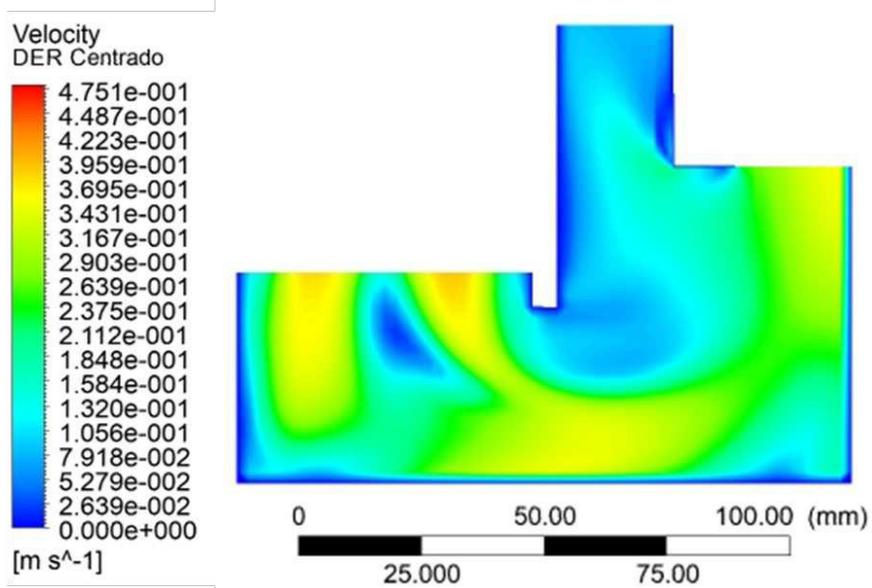


Figura 226. DER CENT 600 rpm

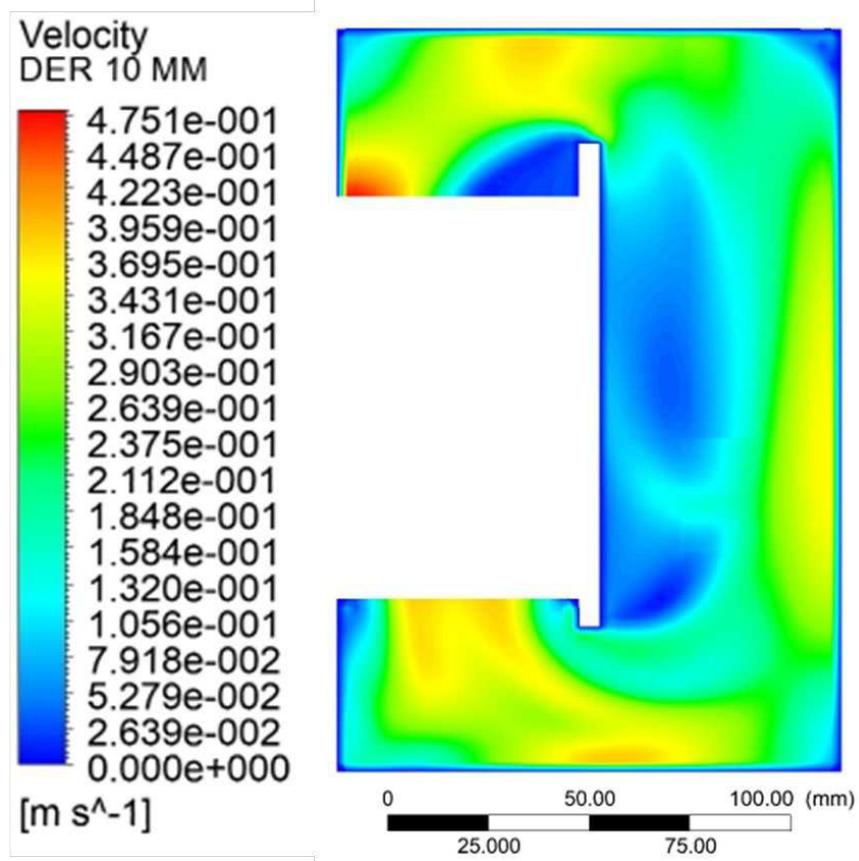


Figura 227. DER 10 MM 600 rpm

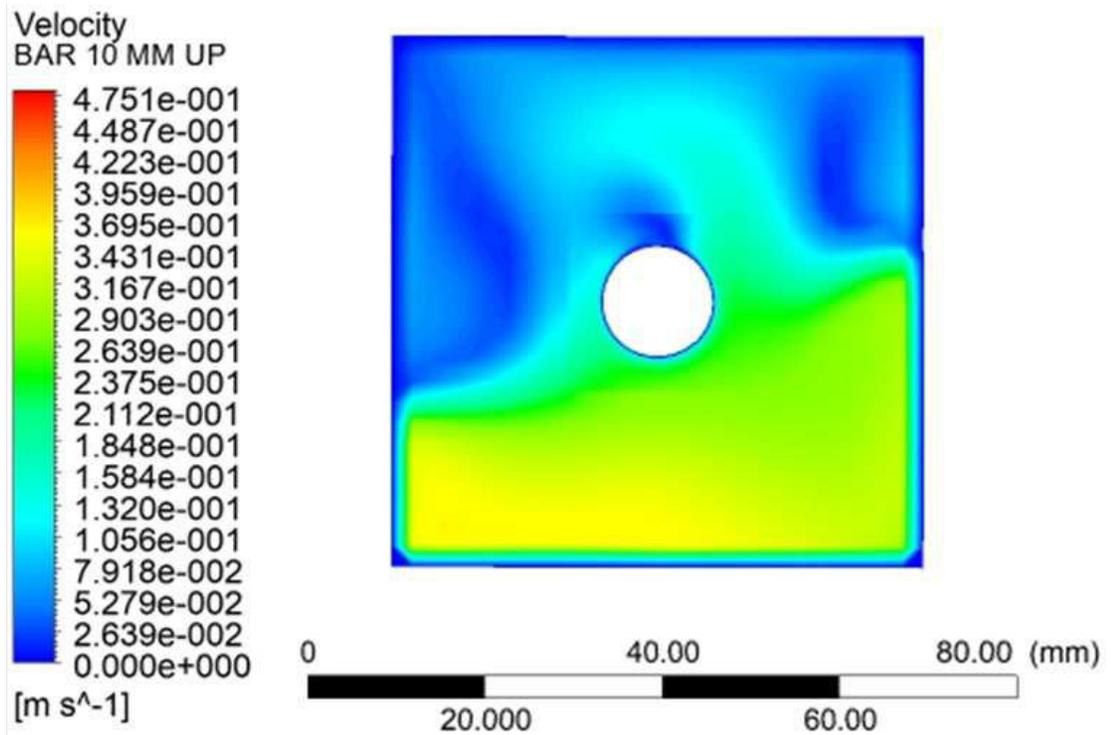


Figura 228. BARRA 10 MM SOBRE 600 rpm

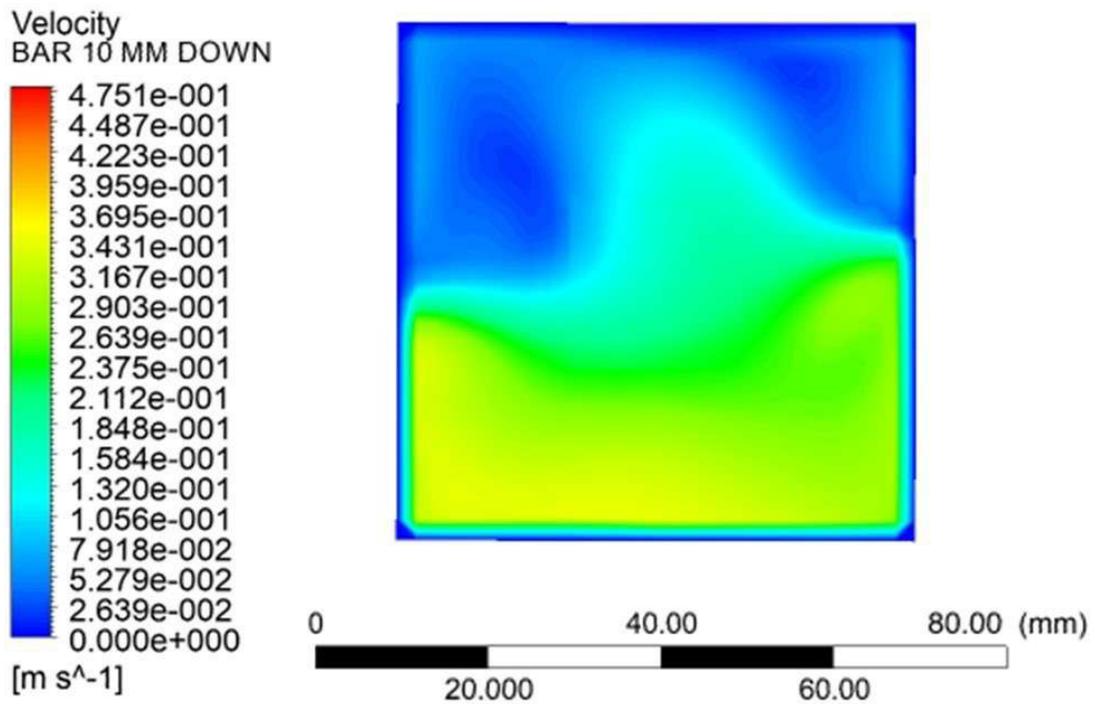


Figura 229. BARRA 10 MM BAJO 600 rpm

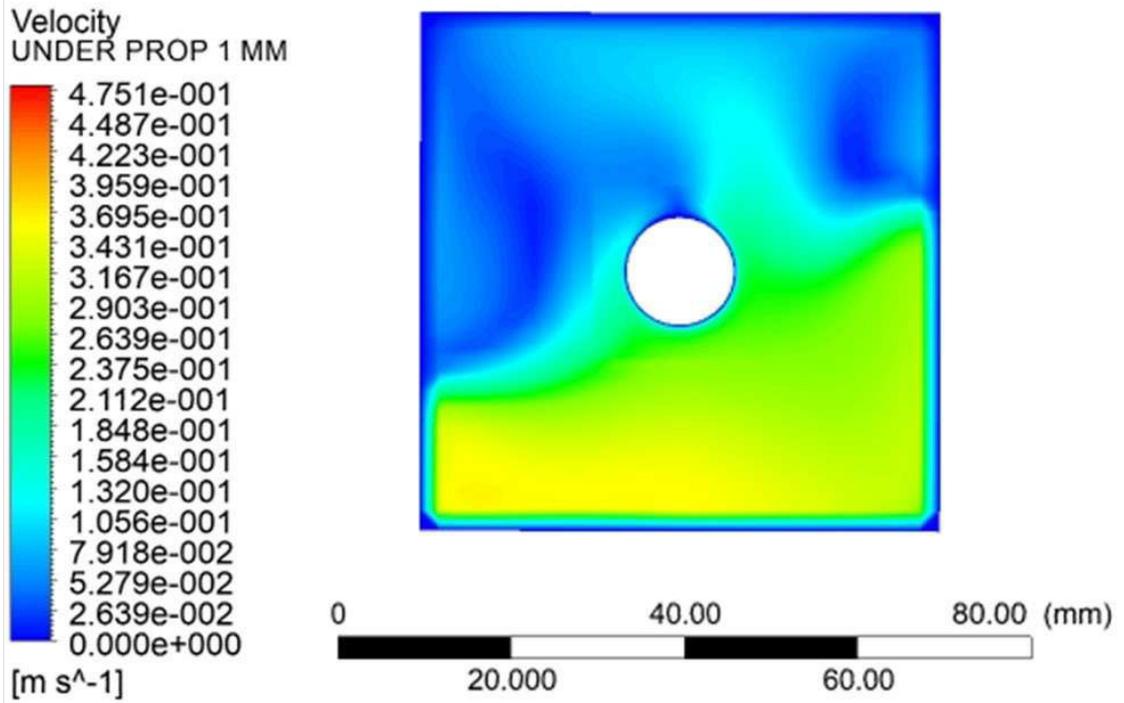


Figura 230. PROPELA 1 MM BAJO 600 rpm

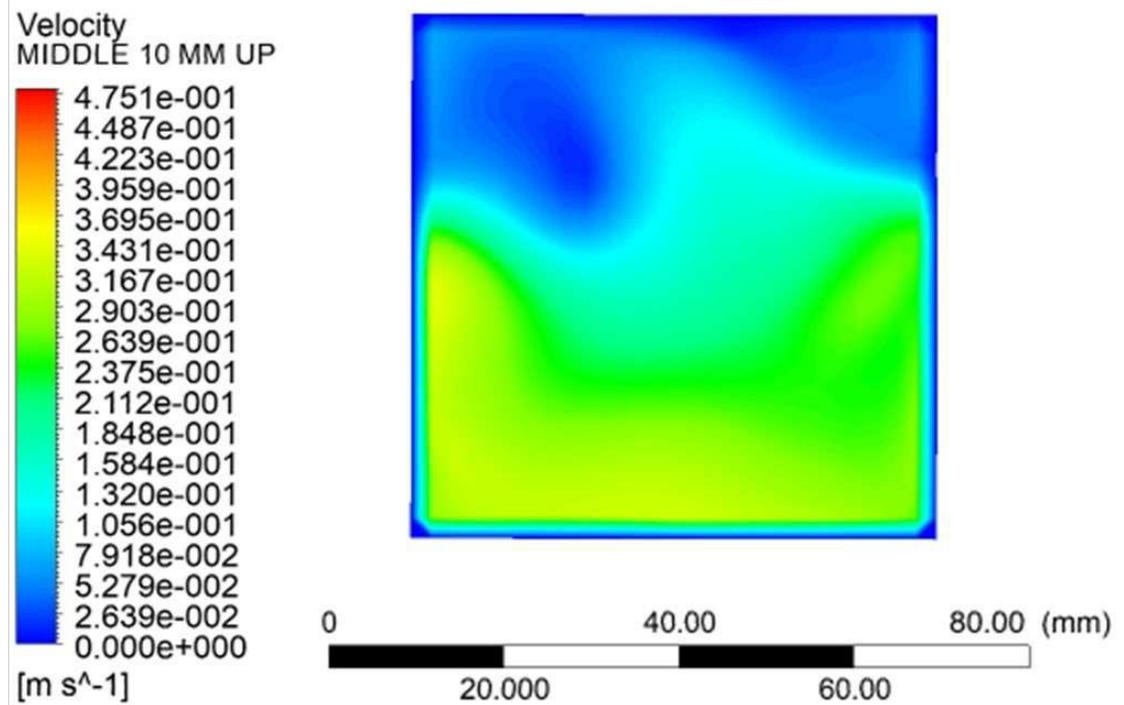


Figura 231. MEDIO 10 MM SOBRE 600 rpm

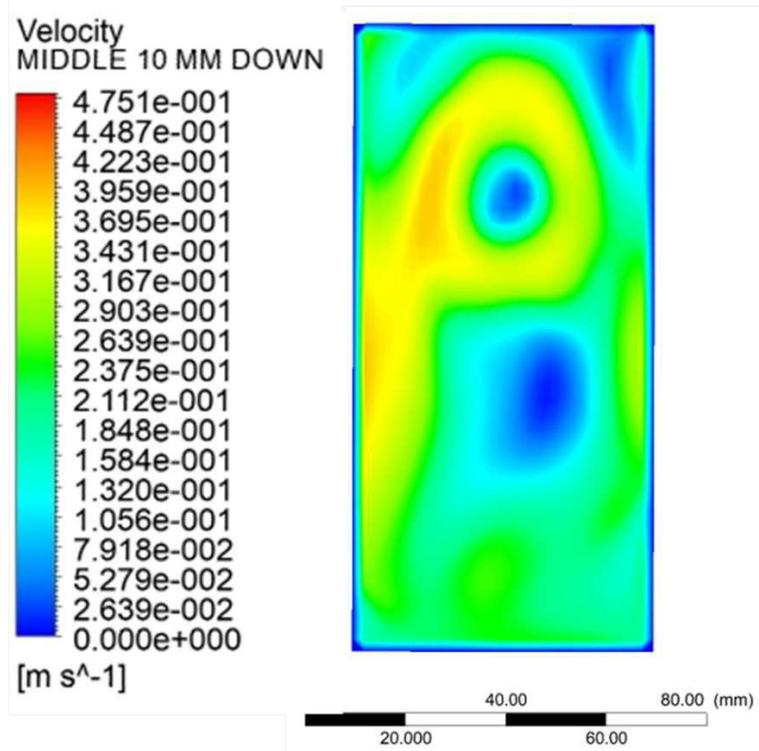


Figura 232. MEDIO 10 MM BAJO 600 rpm

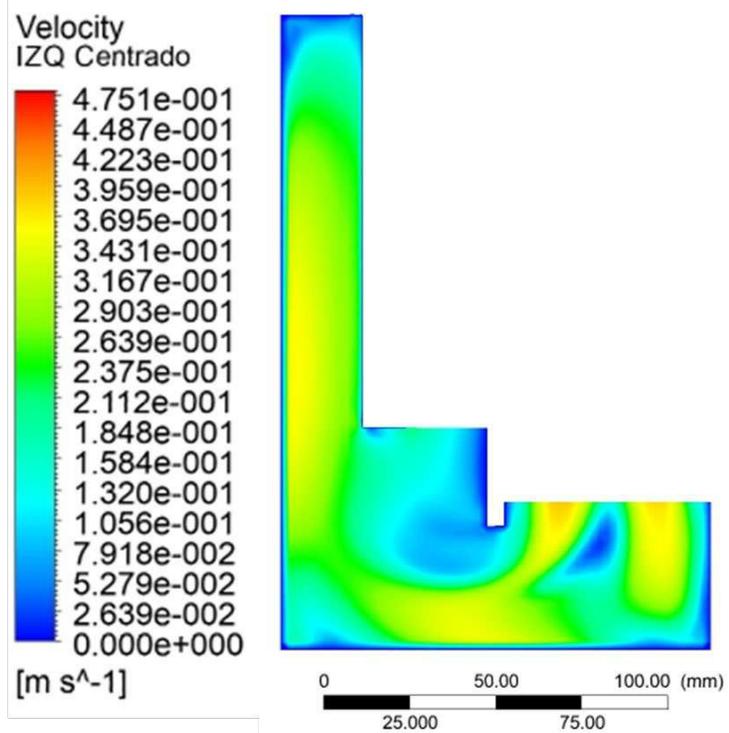


Figura 233. IZQ CENT 600 rpm

4. ZONA 2 A 200 RPM

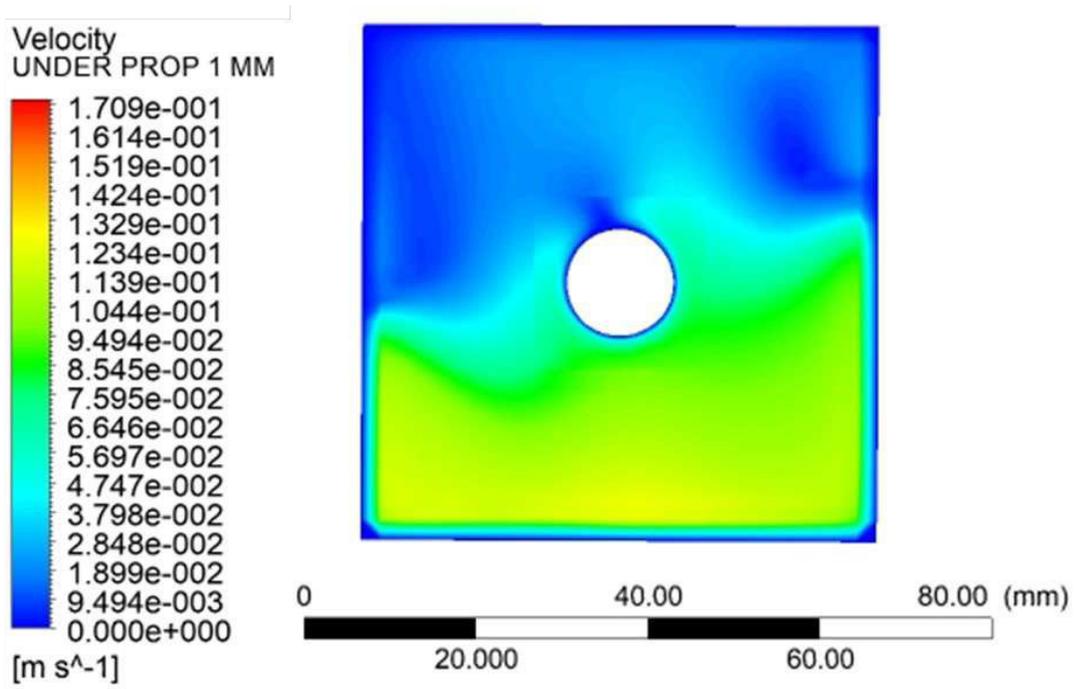


Figura 234. PROPELA 1 MM BAJO 200 rpm

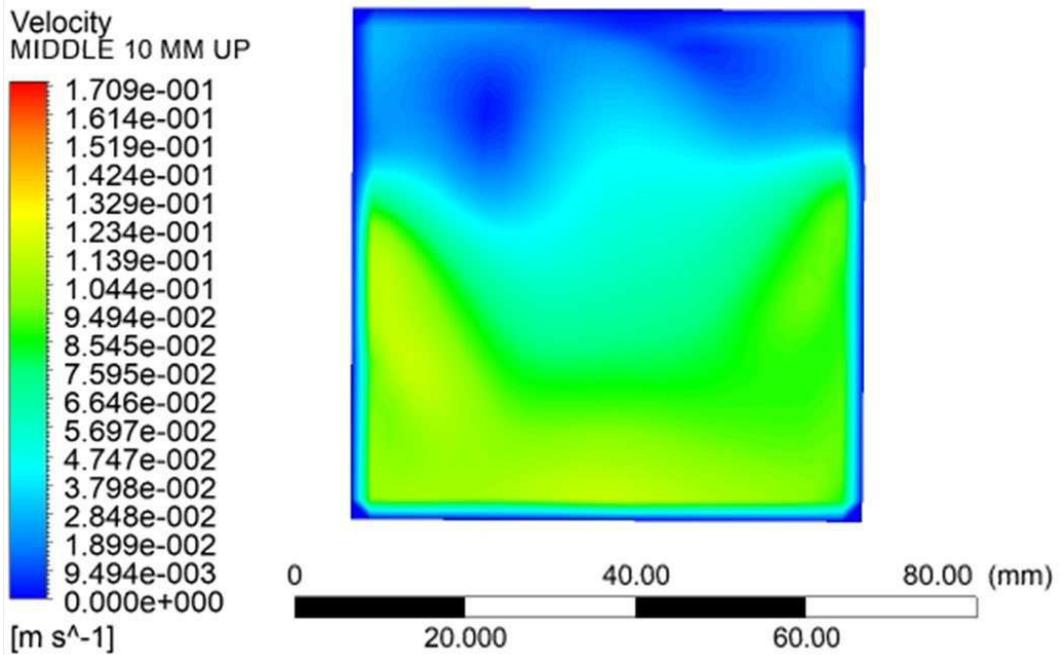


Figura 235. MEDIO 10 MM SOBRE 200 rpm

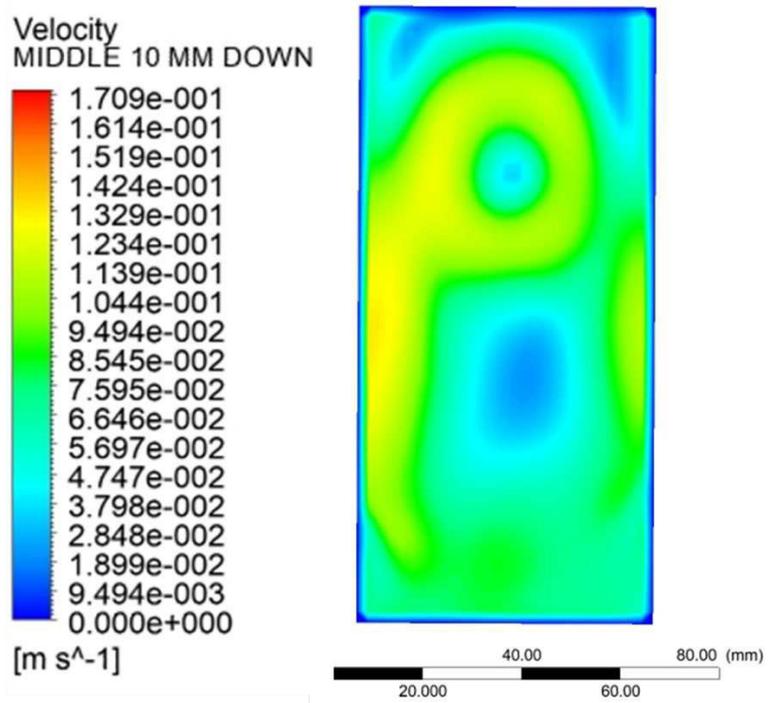


Figura 236. MEDIO 10 MM BAJO 200 rpm

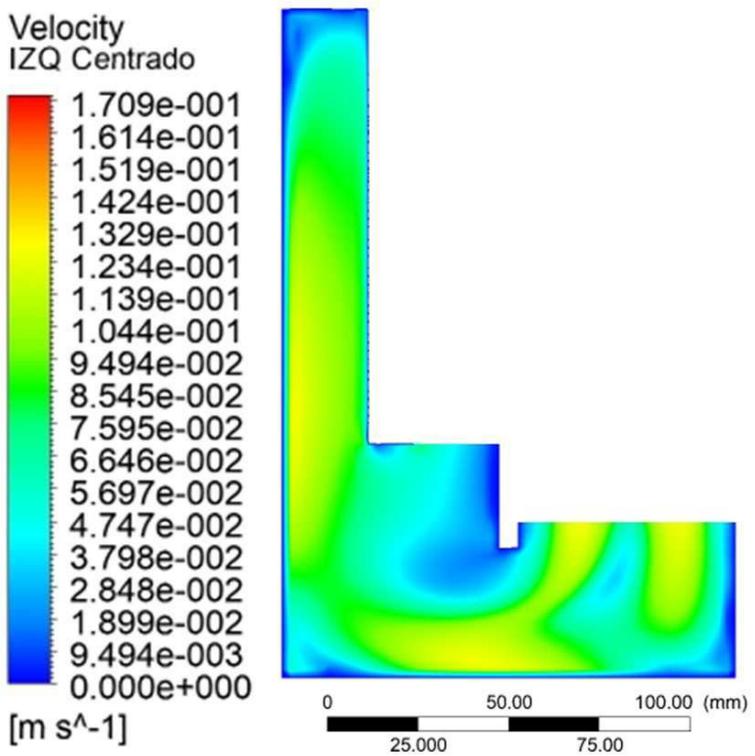


Figura 237. IZQ CENT 200 rpm

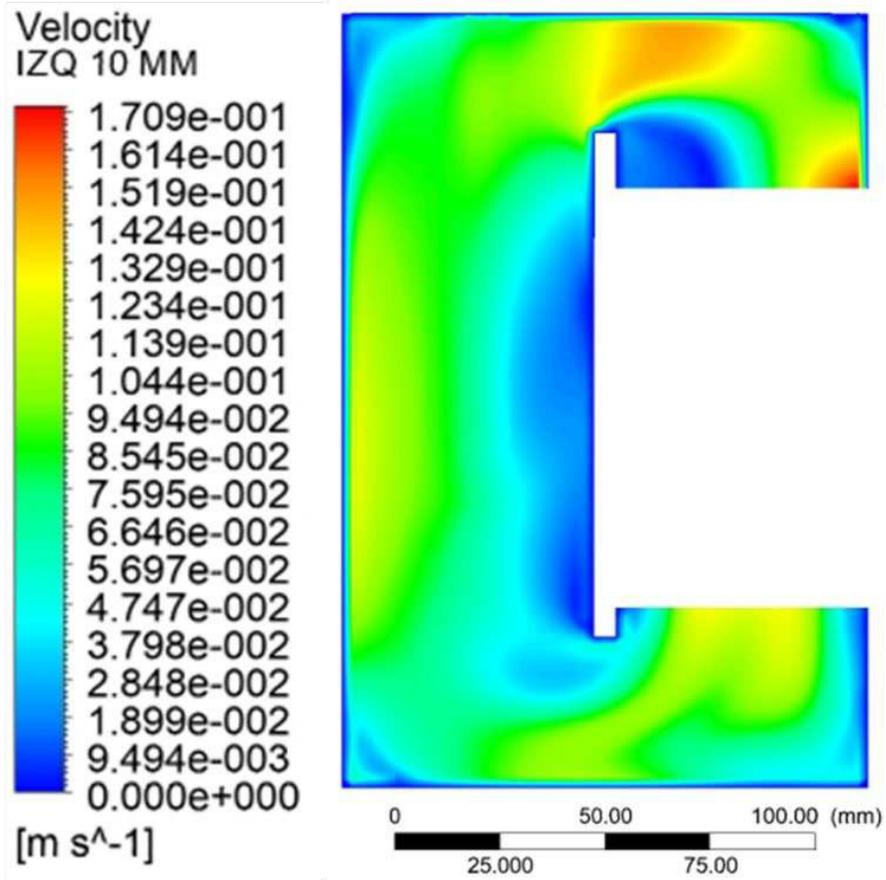


Figura 238. IZQ 10 MM 200 rpm

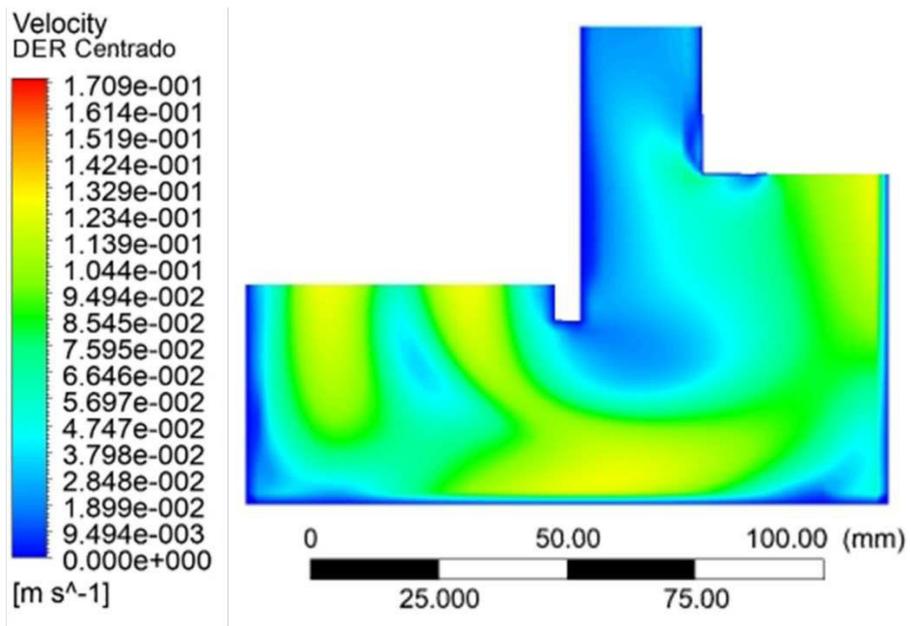


Figura 239. DER CENT 200 rpm

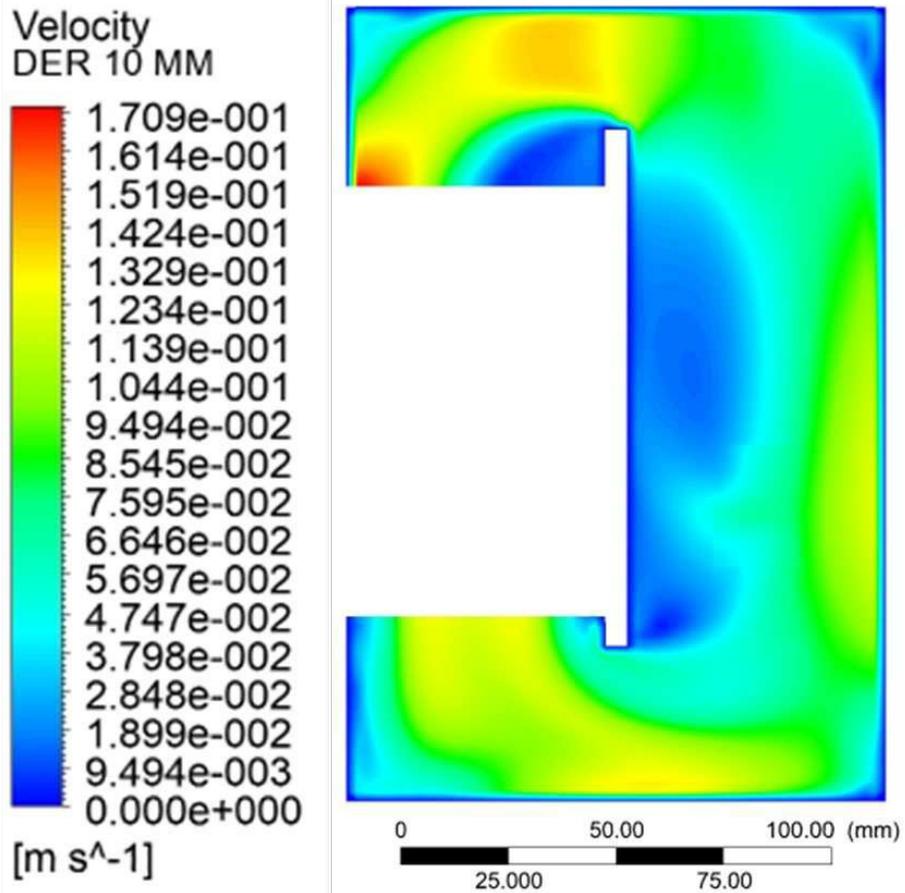


Figura 240. DER 10 MM 200 rpm

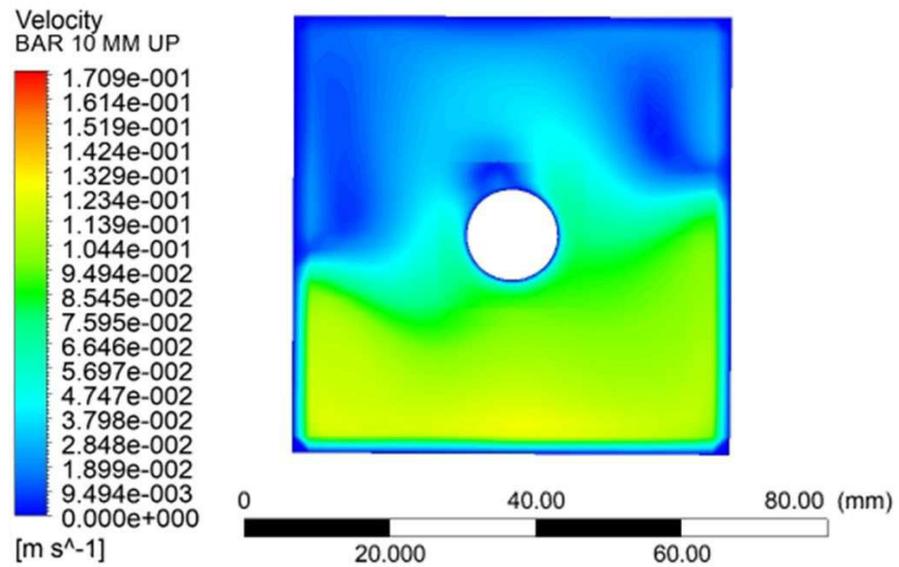


Figura 241. BARRA 10 MM SOBRE

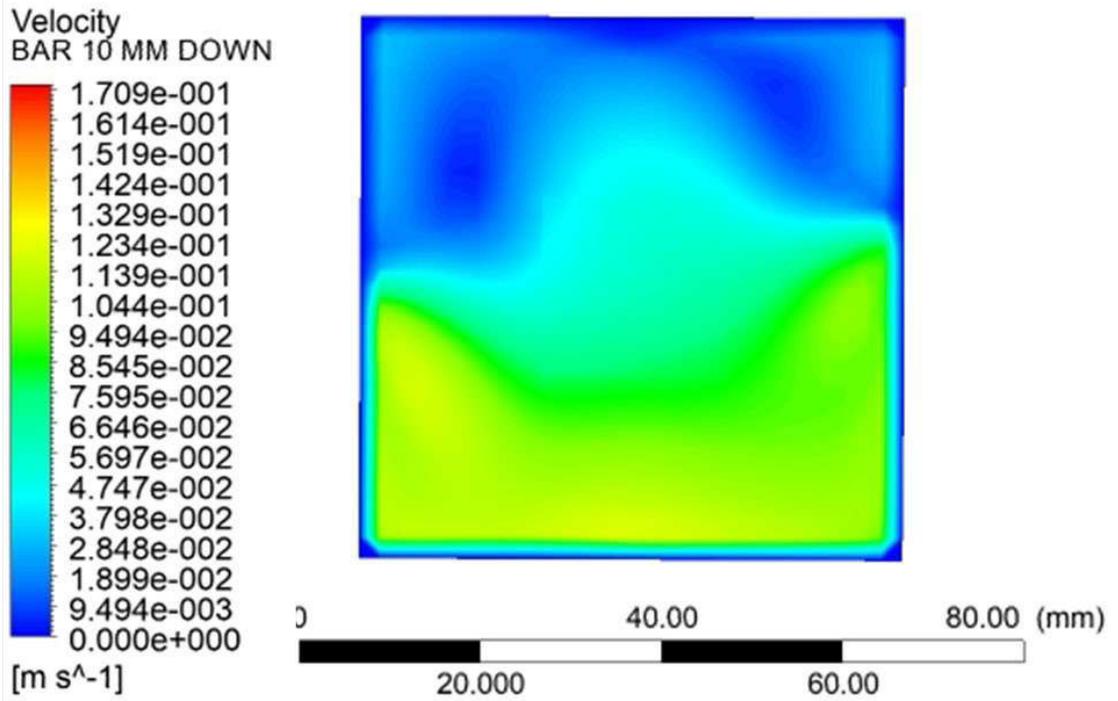


Figura 242. BARRA 10 MM BAJO 200 rpm

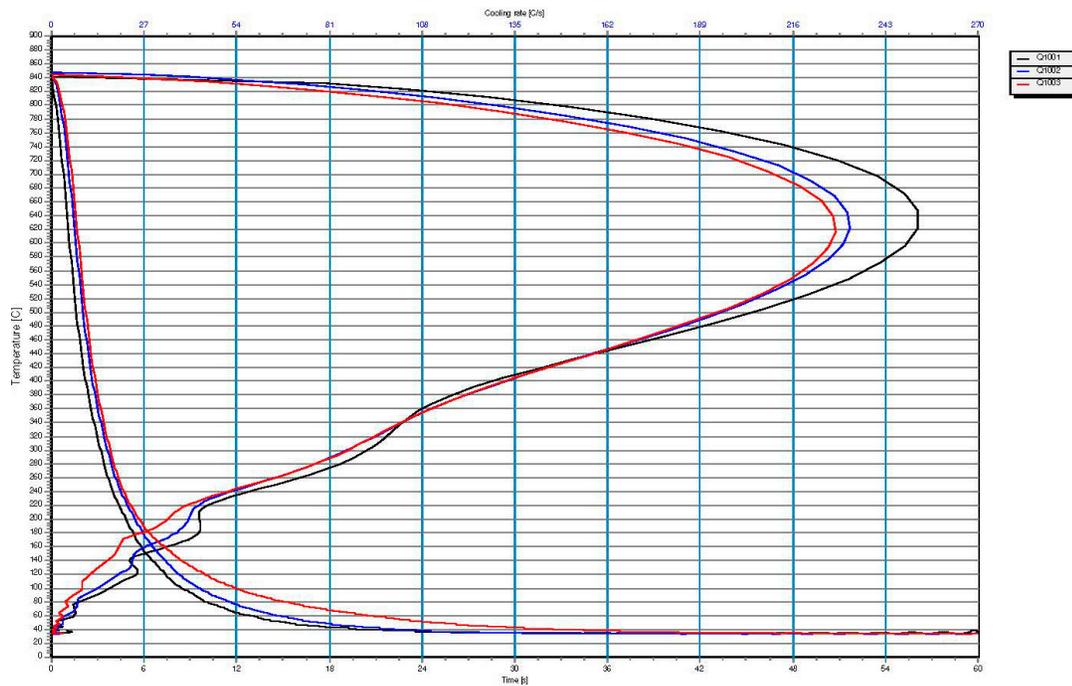
APENDICE G. ARCHIVOS CON INFORMACION DE POSICIONES Y VELOCIDADES DE LOS CAMPOS VECTORIALES DE LOS CORTES EN FORMATO *.CSV (76)

- 1mm bajo prop 200 rpm.csv
- 1mm bajo prop 600 rpm.csv
- 1mm bajo prop 1000 rpm.csv
- barra 10mm down 200rpm.csv
- barra 10mm down 600rpm.csv
- barra 10mm down 1000rpm.csv
- barra 10mm up 200rpm.csv
- barra 10mm up 600rpm.csv
- barra 10mm up 1000rpm.csv
- der 10mm 200rpm.csv
- der 10mm 600rpm.csv
- der 10mm 1000rpm.csv
- der cent 200rpm.csv
- der cent 600rpm.csv
- der cent 1000rpm.csv
- izq 10mm 200rpm.csv
- izq 10mm 600rpm.csv
- izq 10mm 1000rpm.csv
- izq cent 200rpm.csv
- izq cent 600rpm.csv
- izq cent 1000rpm.csv
- middle 10mm down 200rpm.csv
- middle 10mm down 600rpm.csv
- middle 10mm down 1000rpm.csv
- middle 10mm up 200rpm.csv
- middle 10mm up 600rpm.csv
- middle 10mm up 1000rpm.csv

APENDICE H. REPORTES COMPARATIVOS DE CURVAS DE ENFRIAMIENTO/RAZON DE ENFRIAMIENTO

IVF SmartQuench Compare Report

Date of report	16-Aug-18	Probe No.	1001 1002 1003
Report No.	1	Reference probe	inconel
Date of test	06-Aug-18	Product type	
Test site	fime lab	Medium temperature [C]	27
Operator	jose antonio	Medium concentration [%]	1
Folder		Agitation rate [m/s]	200 600 1000 rpm
Approved	Rafael Mercado	Ref. to standard	
Comments			

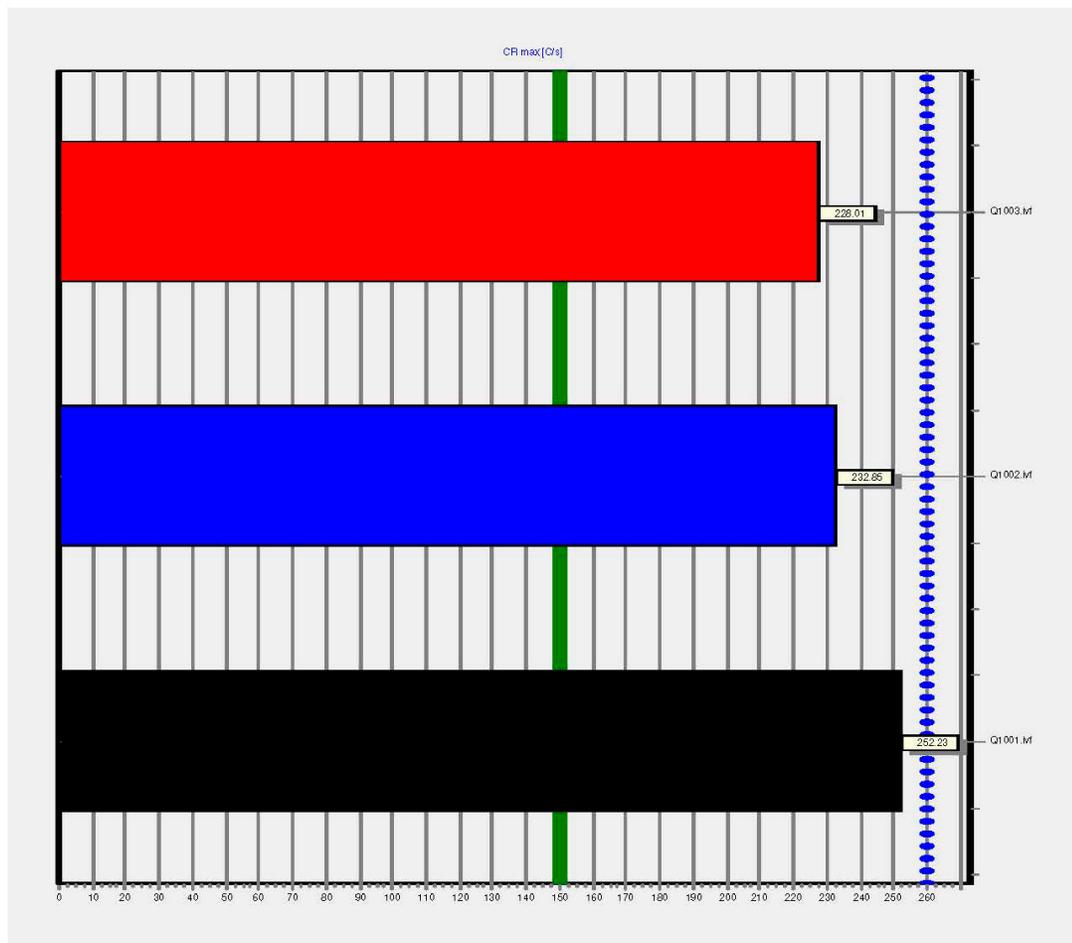


Property	Unit	Q1001.ivf	Q1002.ivf	Q1003.ivf
Maximum Cooling Rate	C/s	252.23	232.85	228.01
Temp. at Max. Cooling Rate	C	650.14	625.46	608.07
Temp at Start of Boiling	C	843.4	846.65	842.63
Temp at Start of Convection	C	205.18	141.39	160.83
Cooling Rate at 300 C	C/s	92.09	86.24	86.22
Time to 600 C	s	1.19	1.59	1.77
Time to 400 C	s	2.23	2.67	2.85
Time to 200 C	s	4.82	5.41	5.67
Theta 1	C	842.28	846.03	842.42
Theta 2	C	303.78	283.56	278.28
HP-IVF (oils)		2964.31	3055.4	2950.79
HP-IVF (polymers)		1868.83	1787.27	1777.43

IVF SmartQuench Evaluation Report

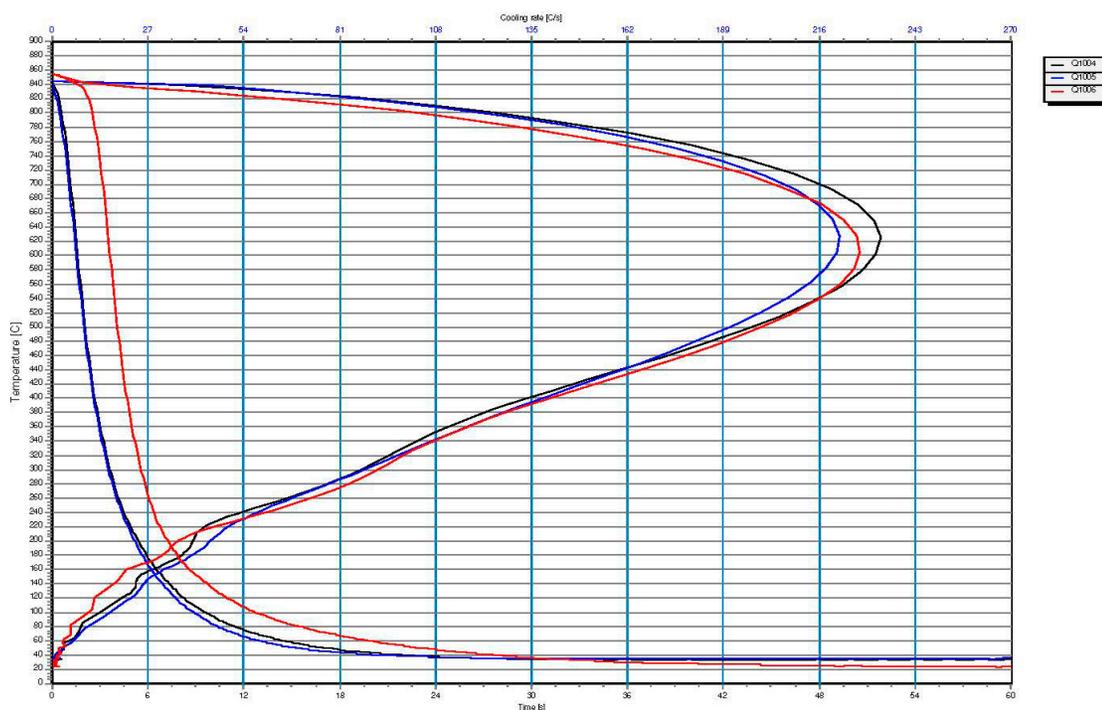
Date of report	16-Aug-18	Probe No.	1001 1002 1003
Report No.	1	Reference probe	inconel
Date of test	06-Aug-18	Product type	
Test site	fime lab	Medium temperature [C]	27
Operator	jose antonio	Medium concentration [%]	1
Folder		Agitation rate [m/s]	200 600 1000 rpm
Approved	Rafael Mercado	Ref. to standard	
Comments			

Characteristic compared	CR max [C/s]				
Control limits	Water	Min	150	Max	260



IVF SmartQuench Compare Report

Date of report	16-Aug-18	Probe No.	1004 1005 1006
Report No.	1	Reference probe	inconel
Date of test	08-Aug-18	Product type	
Test site	fime lab	Medium temperature [C]	27
Operator	jose antonio	Medium concentration [%]	1
Folder		Agitation rate [m/s]	200 600 1000 rpm
Approved	Rafael Mercado	Ref. to standard	
Comments			

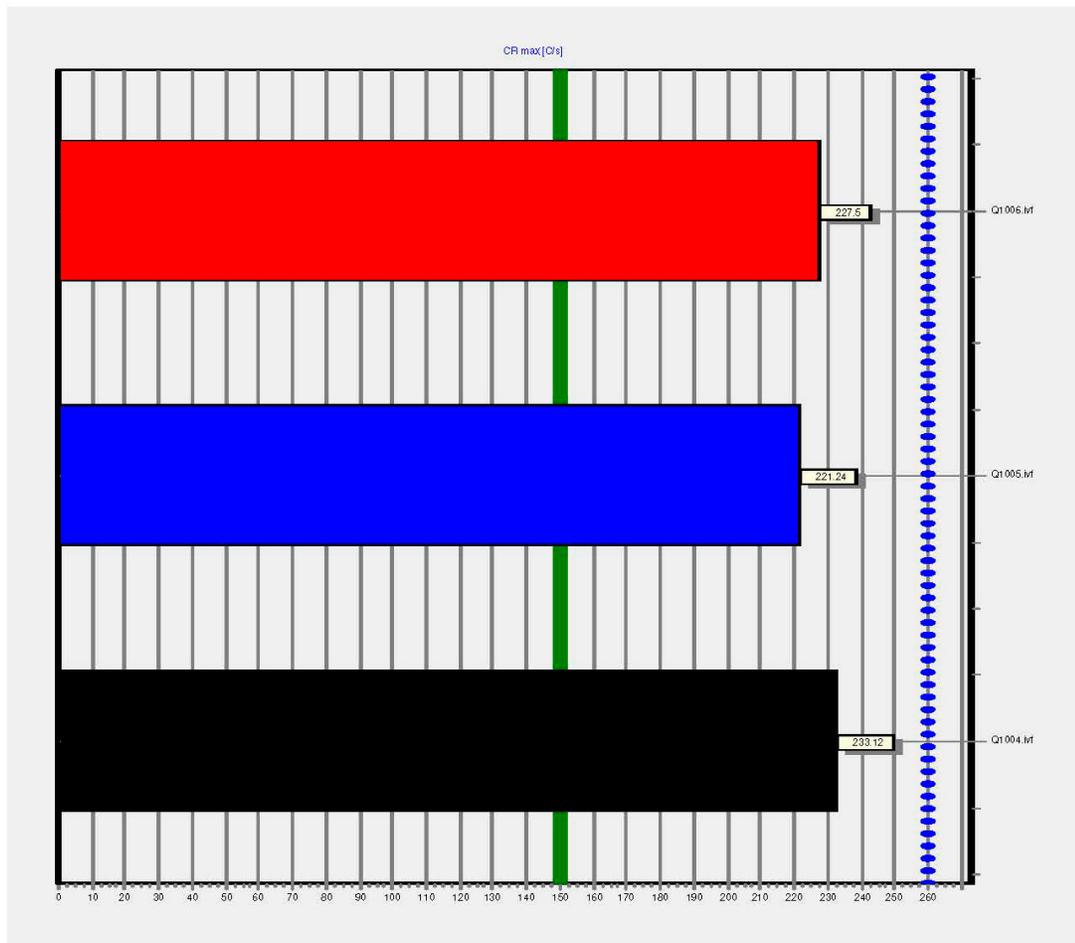


Property	Unit	Q1004.ivf	Q1005.ivf	Q1006.ivf
Maximum Cooling Rate	C/s	233.12	221.24	227.5
Temp. at Max. Cooling Rate	C	629.37	636.37	606.04
Temp at Start of Boiling	C	843.91	844.97	842.18
Temp at Start of Convection	C	106.99	74.49	149.91
Cooling Rate at 300 C	C/s	86.88	88.02	91.75
Time to 600 C	s	1.61	1.52	3.62
Time to 400 C	s	2.68	2.61	4.67
Time to 200 C	s	5.39	5.16	7.24
Theta 1	C	843.34	844.28	841.58
Theta 2	C	283.32	275.46	217.01
HP-IVF (oils)		3200.46	3223.3	3027.24
HP-IVF (polymers)		1798.87	1805.09	1852.07

IVF SmartQuench Evaluation Report

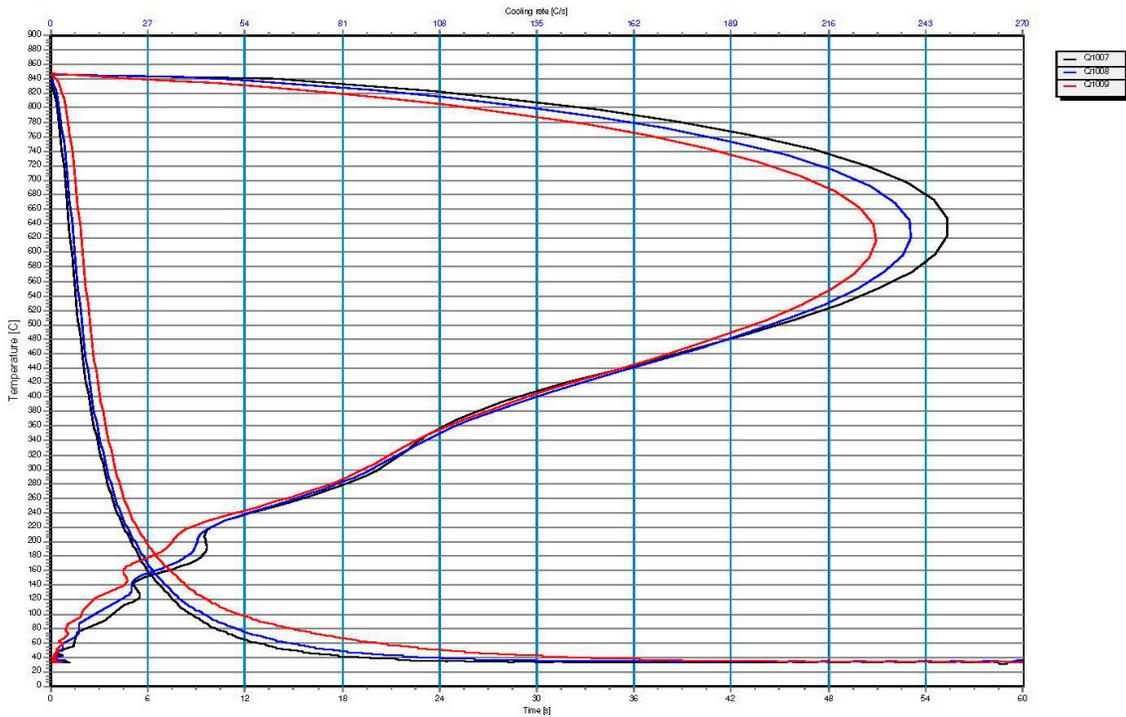
Date of report	16-Aug-18	Probe No.	1004 1005 1006
Report No.	1	Reference probe	inconel
Date of test	08-Aug-18	Product type	
Test site	fime lab	Medium temperature [C]	27
Operator	jose antonio	Medium concentration [%]	1
Folder		Agitation rate [m/s]	200 600 1000 rpm
Approved	Rafael Mercado	Ref. to standard	
Comments			

Characteristic compared	CR max [C/s]				
Control limits	Water	Min	150	Max	260



IVF SmartQuench Compare Report

Date of report	16-Aug-18	Probe No.	1007 1008 1009
Report No.	1	Reference probe	inconel
Date of test	10-Aug-18	Product type	
Test site	fime lab	Medium temperature [C]	27
Operator	jose antonio	Medium concentration [%]	1
Folder		Agitation rate [m/s]	200 600 1000 rpm
Approved	Rafael Mercado	Ref. to standard	
Comments			

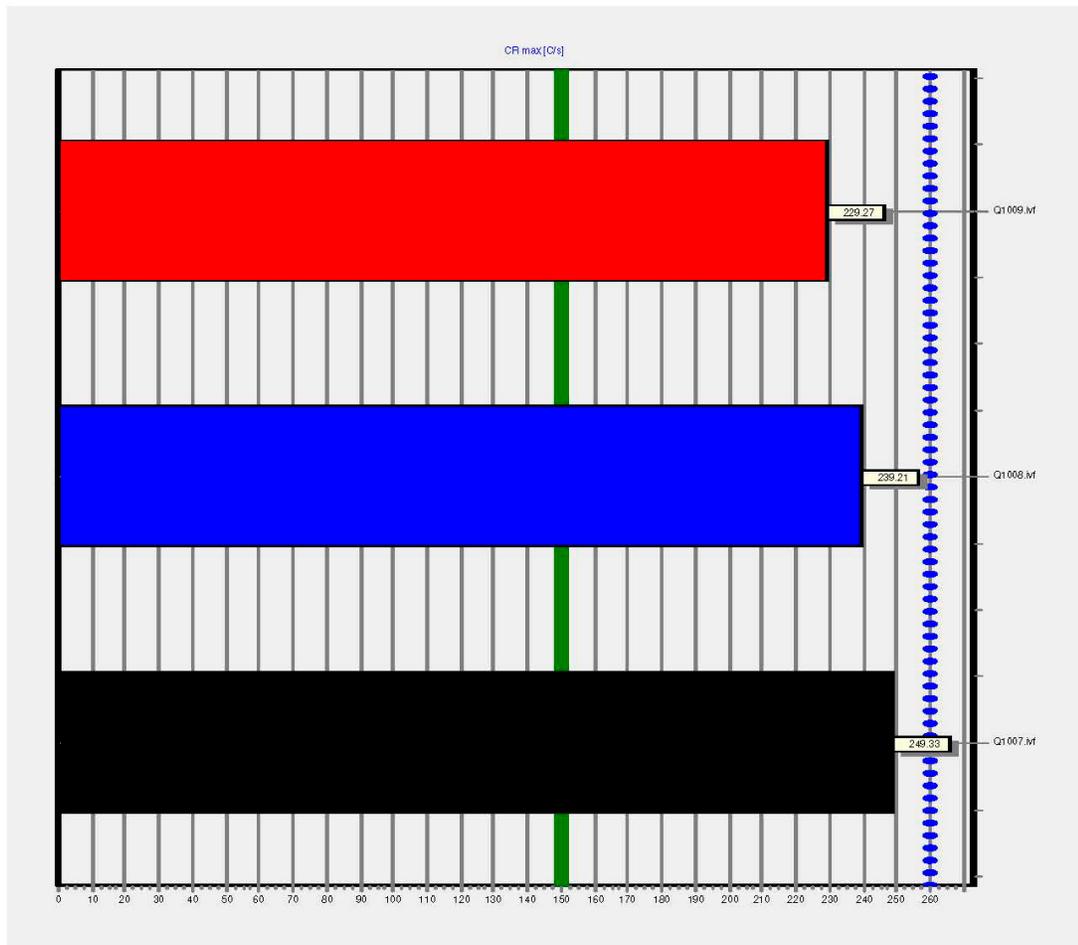


Property	Unit	Q1007.ivf	Q1008.ivf	Q1009.ivf
Maximum Cooling Rate	C/s	249.33	239.21	229.27
Temp. at Max. Cooling Rate	C	645	630.27	626.07
Temp at Start of Boiling	C	846.87	845.56	844.55
Temp at Start of Convection	C	207.08	139.9	159.25
Cooling Rate at 300 C	C/s	90.81	88.89	86.64
Time to 600 C	s	1.29	1.49	1.97
Time to 400 C	s	2.35	2.54	3.05
Time to 200 C	s	4.97	5.19	5.88
Theta 1	C	845.84	844.66	844.65
Theta 2	C	302.31	285.88	269.76
HP-IVF (oils)		2929.94	3122.72	2973.31
HP-IVF (polymers)		1856.35	1833.24	1782.31

IVF SmartQuench Evaluation Report

Date of report	16-Aug-18	Probe No.	1007 1008 1009
Report No.	1	Reference probe	inconel
Date of test	10-Aug-18	Product type	
Test site	fime lab	Medium temperature [C]	27
Operator	jose antonio	Medium concentration [%]	1
Folder		Agitation rate [m/s]	200 600 1000 rpm
Approved	Rafael Mercado	Ref. to standard	
Comments			

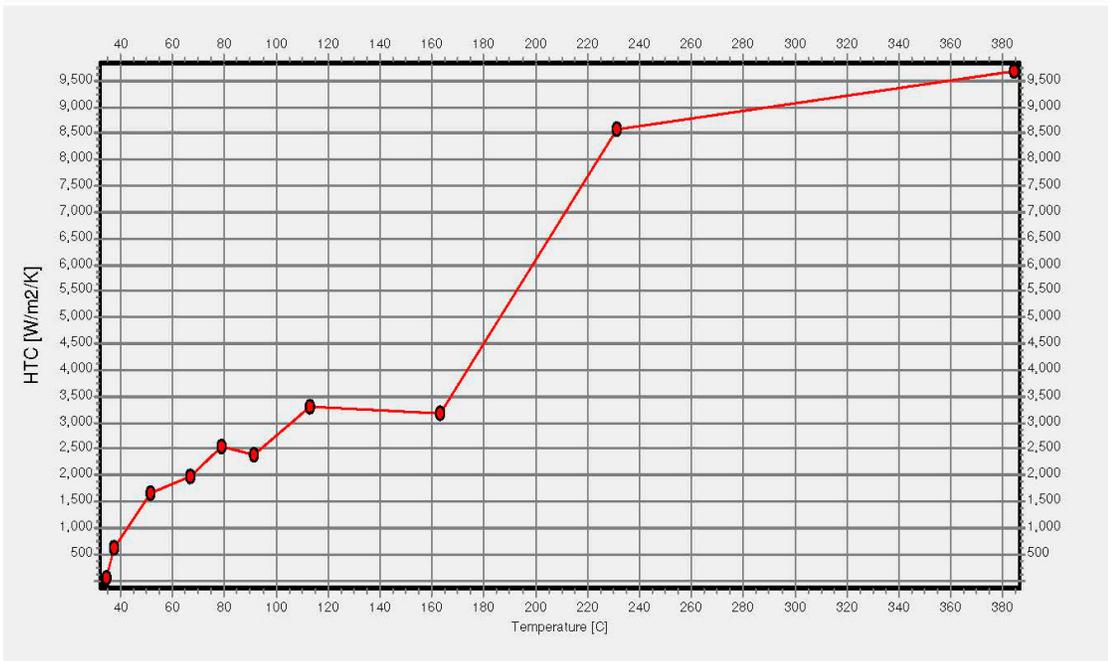
Characteristic compared	CR max [C/s]				
Control limits	Water	Min	150	Max	260



APENDICE I. REPORTES DEL CÁLCULO DE HTC (133)

SQi Heat Transfer Calculation - Report

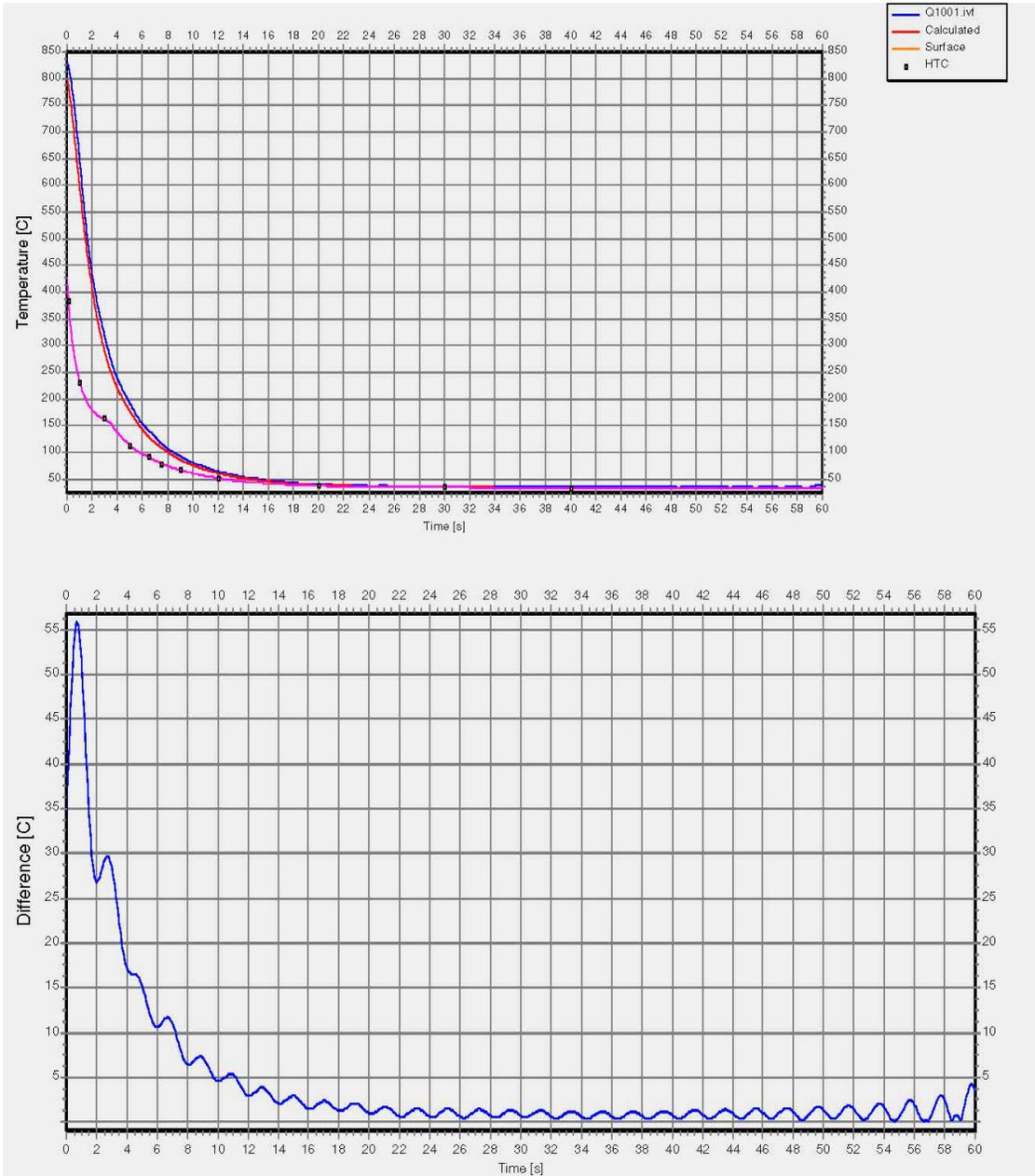
Date of report	13-Aug-18	Probe No.	1001
Report No.	inicial	Cooling curve name	Q1001.ivf
Date of test	10-Aug-18	Medium temp. [C]	27
Test site	fimelab	Medium conc. [%]	0
Operator	Jose Antonio	Agitation rate [m/s]	1000 rpm
Approved	LLL	HTC(T) file name	inconel600 a 1000 rpm.thtc
Comments			



Temperature, C	HTC, W/m2K
384.4	9682.4
231.2	8576.2
163.1	3183.5
113.0	3308.4
91.3	2400.4
79.0	2532.4
66.9	1962.4
51.6	1644.3
37.5	631.8
34.5	62.0
34.2	17.6
0.0	0.0
0.0	600.0

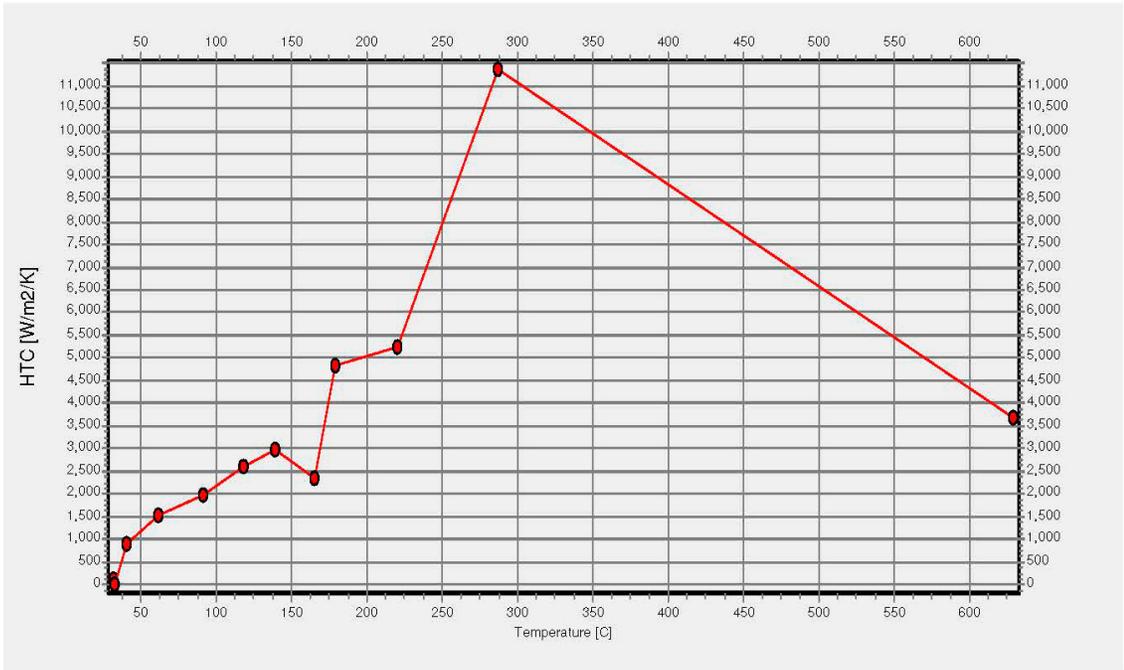
SQi Heat Transfer Calculation - Report

Date of report	13-Aug-18	Probe No.	1001
Report No.	inical	Cooling curve name	Q1001.ivf
Date of test	10-Aug-18	Medium temp. [C]	27
Test site	finelab	Medium conc. [%]	0
Operator	Jose Antonio	Agitation rate [m/s]	1000 rpm
Approved	LLL	HTC(T) file name	inconel600 a 1000 rpm.thtc
Comments			



SQi Heat Transfer Calculation - Report

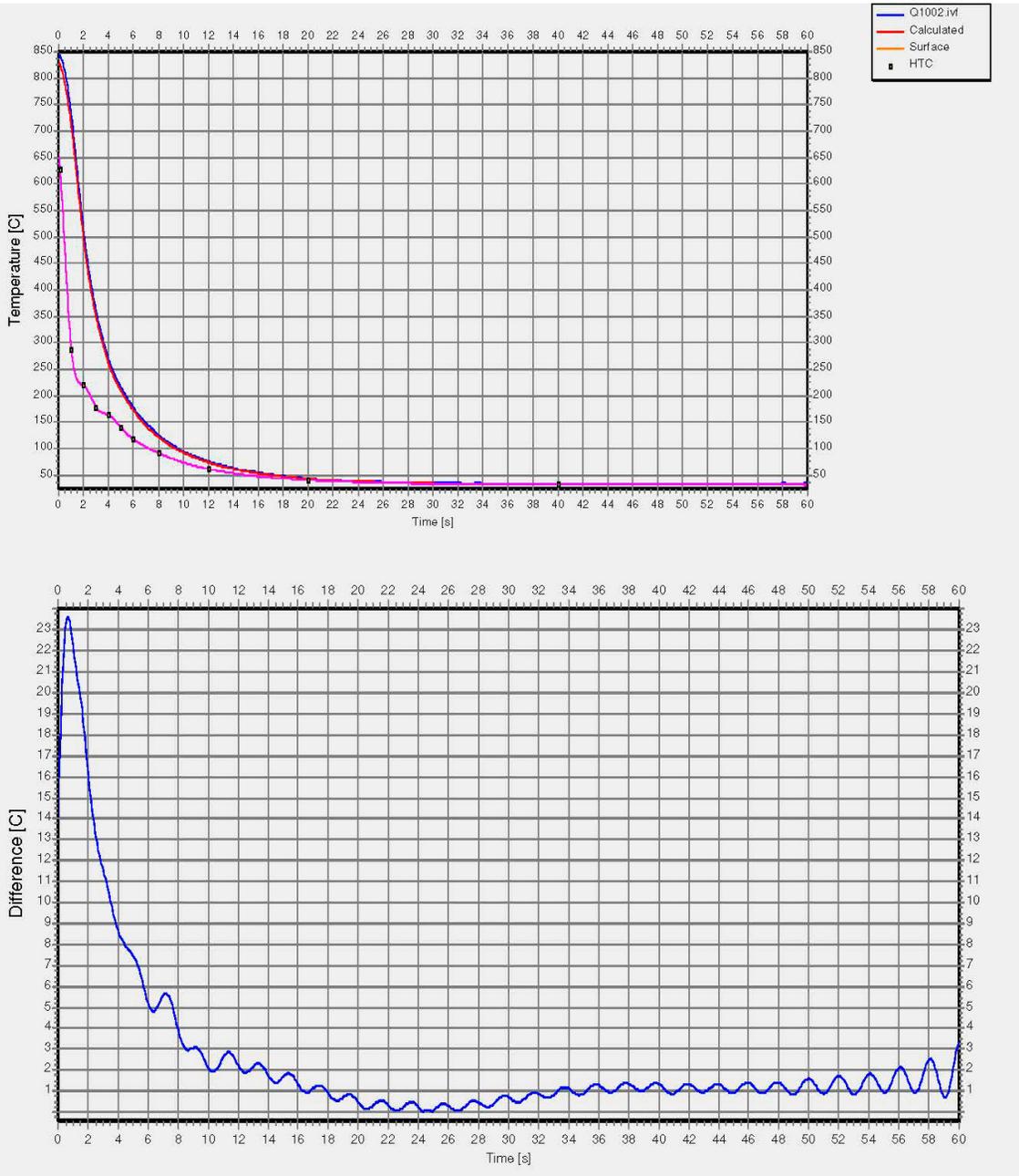
Date of report	13-Aug-18	Probe No.	1002
Report No.	inicial	Cooling curve name	Q1002.ivf
Date of test	10-Aug-18	Medium temp. [C]	27
Test site	fmelab	Medium conc. [%]	0
Operator	Jose Antonio	Agitation rate [m/s]	600 rpm
Approved	LLL	HTC(T) file name	inconel600 a 600 rpm.thtc
Comments			



Temperature, C	HTC, W/m²K
628.9	3667.7
286.8	11366.9
220.1	5221.9
179.0	4817.9
165.1	2346.1
139.2	2985.1
117.8	2589.0
91.3	1986.4
61.6	1537.0
40.5	886.5
32.4	0.0
31.7	116.1
0.0	600.0

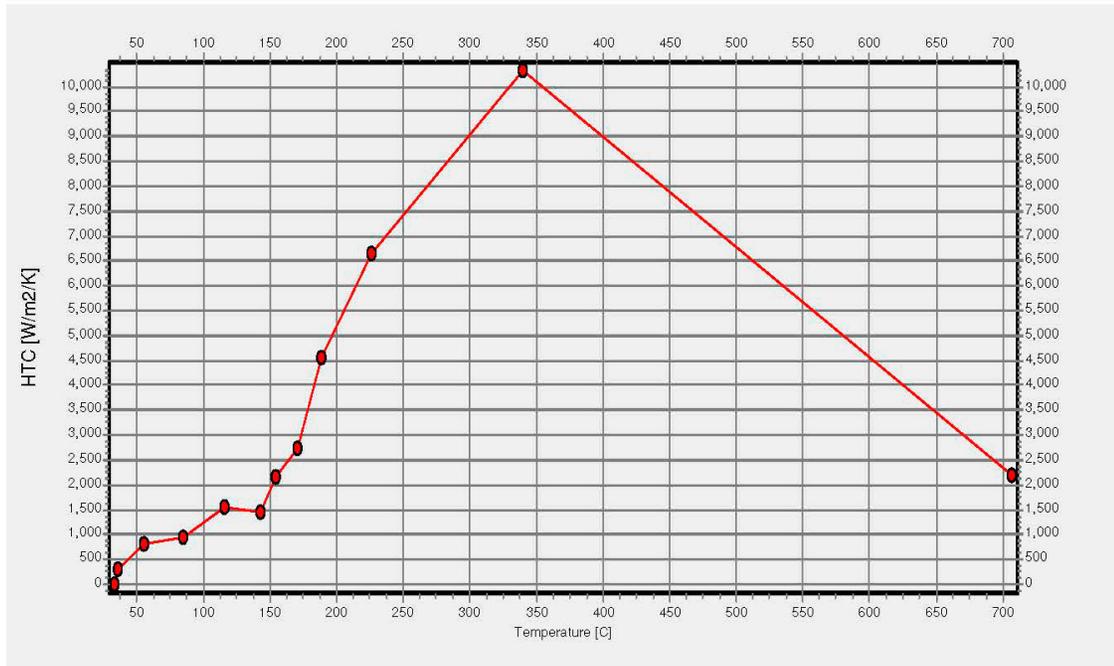
SQi Heat Transfer Calculation - Report

Date of report	13-Aug-18	Probe No.	1002
Report No.	inicial	Cooling curve name	Q1002.ivf
Date of test	10-Aug-18	Medium temp. [C]	27
Test site	fimelab	Medium conc. [%]	0
Operator	Jose Antonio	Agitation rate [m/s]	600 rpm
Approved	LLL	HTC(T) file name	inconel600 a 600 rpm.thtc
Comments			



SQi Heat Transfer Calculation - Report

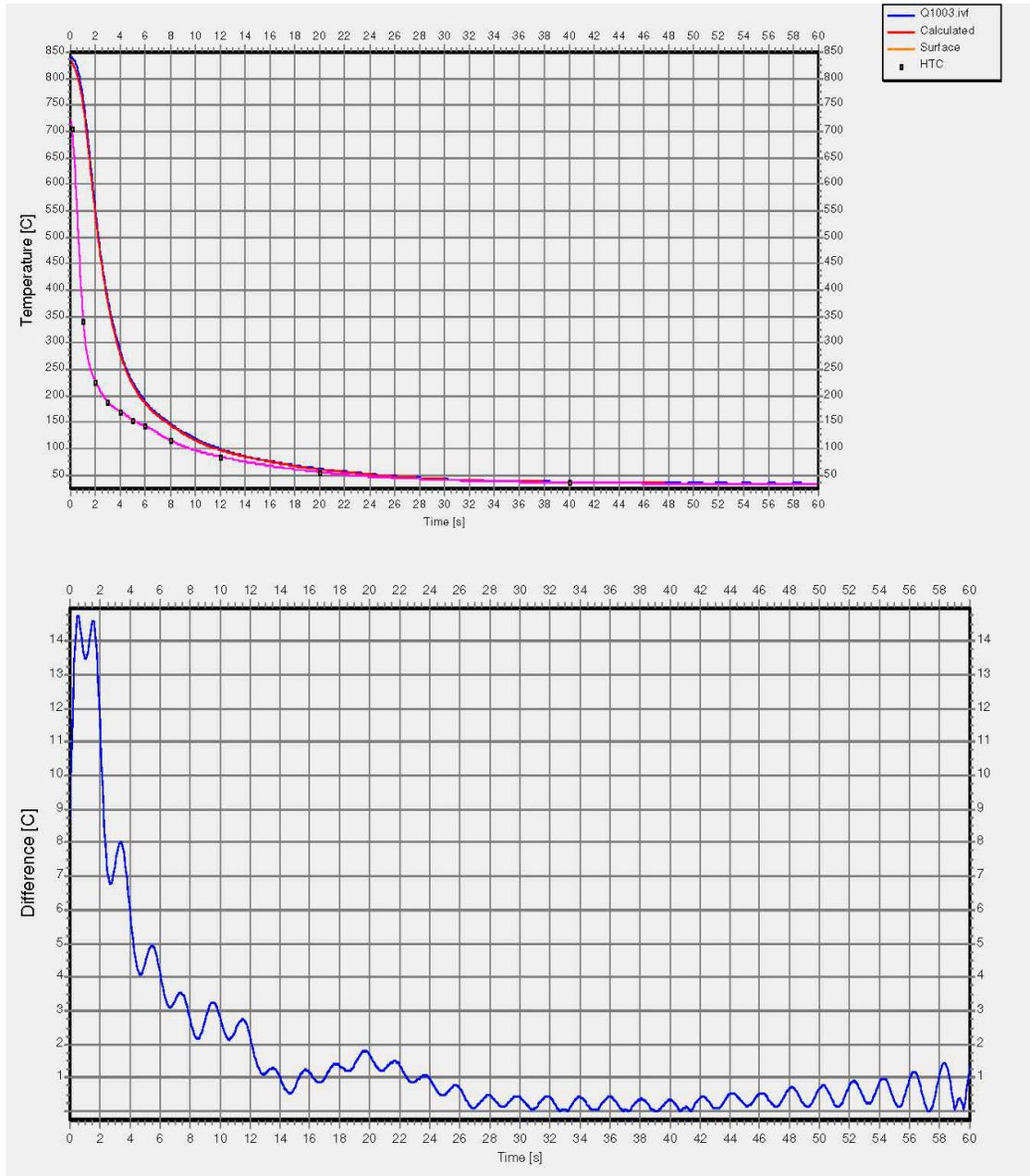
Date of report	13-Aug-18	Probe No.	1003
Report No.	inicial	Cooling curve name	Q1003.ivf
Date of test	10-Aug-18	Medium temp. [C]	27
Test site	finelab	Medium conc. [%]	0
Operator	Jose Antonio	Agitation rate [m/s]	200 rpm
Approved	LLL	HTC(T) file name	inconel600 a 200 rpm.thtc
Comments			



Temperature, C	HTC, W/m2K
706.7	2190.8
340.0	10326.6
226.4	6657.0
188.4	4564.6
170.5	2747.9
154.1	2159.2
142.7	1461.2
115.7	1552.7
85.0	929.7
55.4	815.7
35.7	292.8
33.3	0.0
0.0	600.0

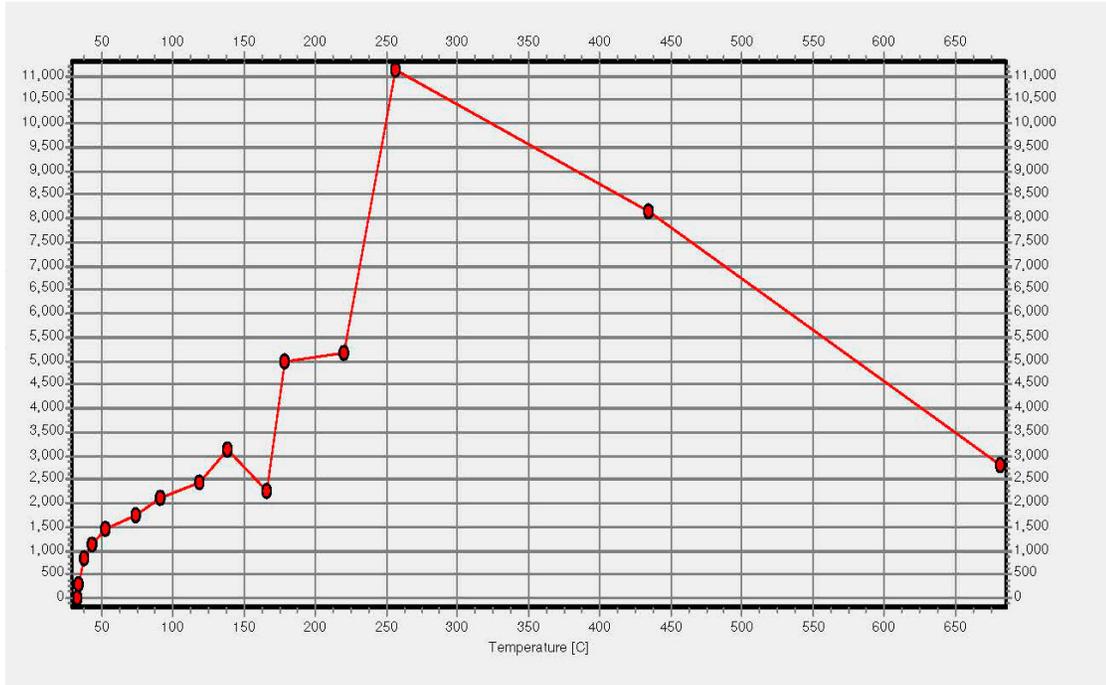
SQi Heat Transfer Calculation - Report

Date of report	13-Aug-18	Probe No.	1003
Report No.	inicial	Cooling curve name	Q1003.ivf
Date of test	10-Aug-18	Medium temp. [C]	27
Test site	fmelab	Medium conc. [%]	0
Operator	Jose Antonio	Agitation rate [m/s]	200 rpm
Approved	LLL	HTC(T) file name	inconel600 a 200 rpm.thtc
Comments			



SQi Heat Transfer Calculation - Report

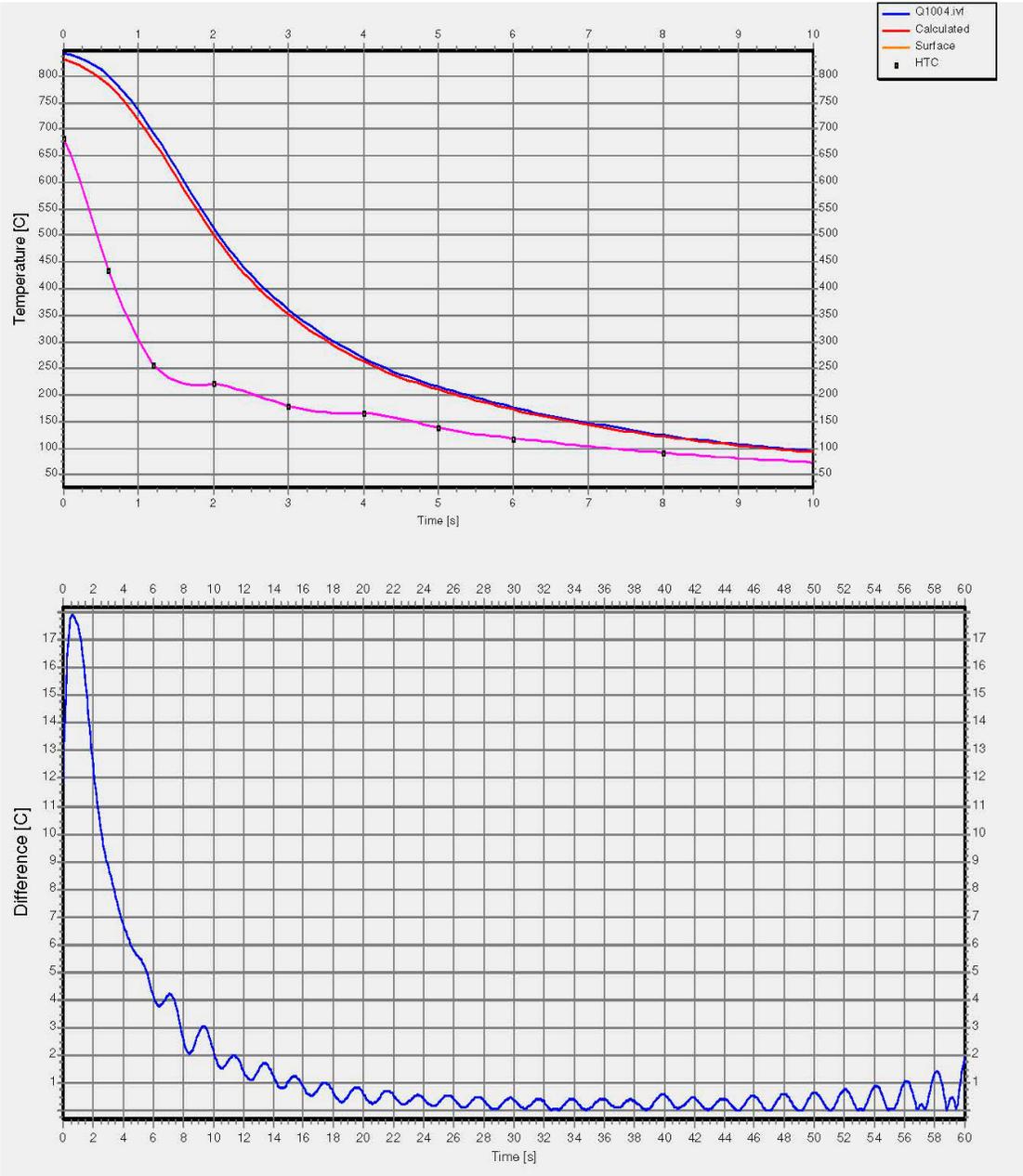
Date of report	16-Aug-18	Probe No.	1004
Report No.	1	Cooling curve name	Q1004.ivf
Date of test	10-Aug-18	Medium temp. [C]	27
Test site	fimelab	Medium conc. [%]	0
Operator	Jose Antonio	Agitation rate [m/s]	1000 rpm
Approved	Rafael Mercado	HTC(T) file name	initial.htc
Comments	600 rpm		



Temperature, C	HTC, W/m²K
681.7	2794.9
434.2	8138.9
256.4	11129.2
220.4	5152.2
178.8	4965.3
166.2	2270.4
138.5	3145.8
118.6	2446.7
91.2	2098.6
73.6	1729.9
52.8	1436.7
42.7	1117.4
37.6	838.6
33.7	297.2
32.8	0.0
32.8	0.0

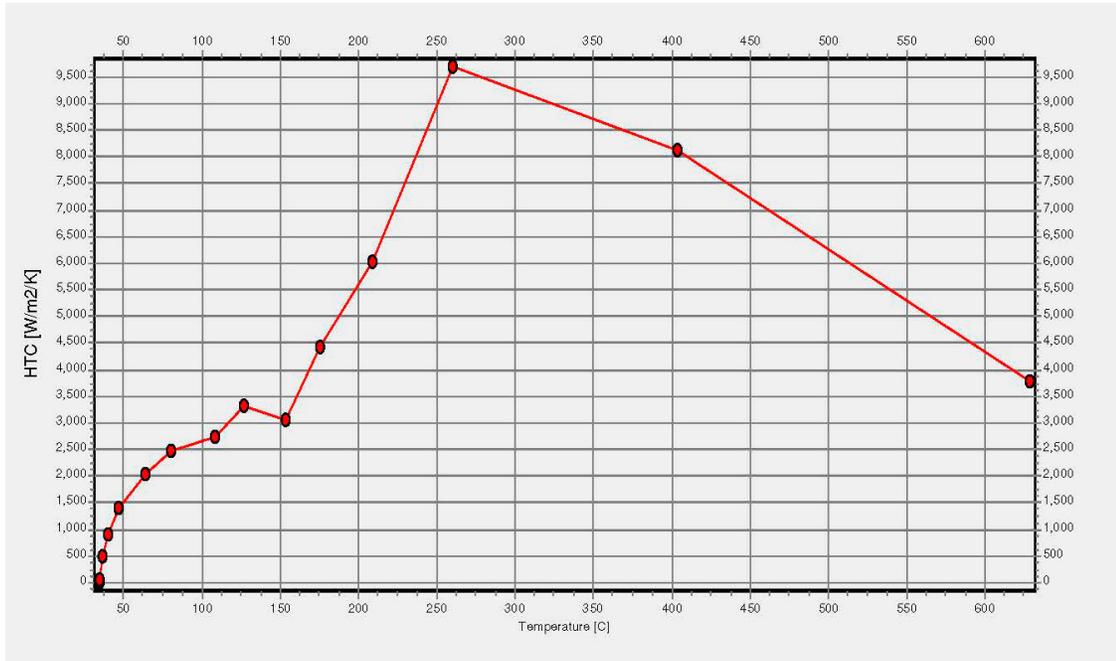
SQi Heat Transfer Calculation - Report

Date of report	16-Aug-18	Probe No.	1004
Report No.	1	Cooling curve name	Q1004.ivf
Date of test	10-Aug-18	Medium temp. [C]	27
Test site	fmelab	Medium conc. [%]	0
Operator	Jose Antonio	Agitation rate [m/s]	1000 rpm
Approved	Rafael Mercado	HTC(T) file name	initial.htc
Comments	600 rpm		



SQi Heat Transfer Calculation - Report

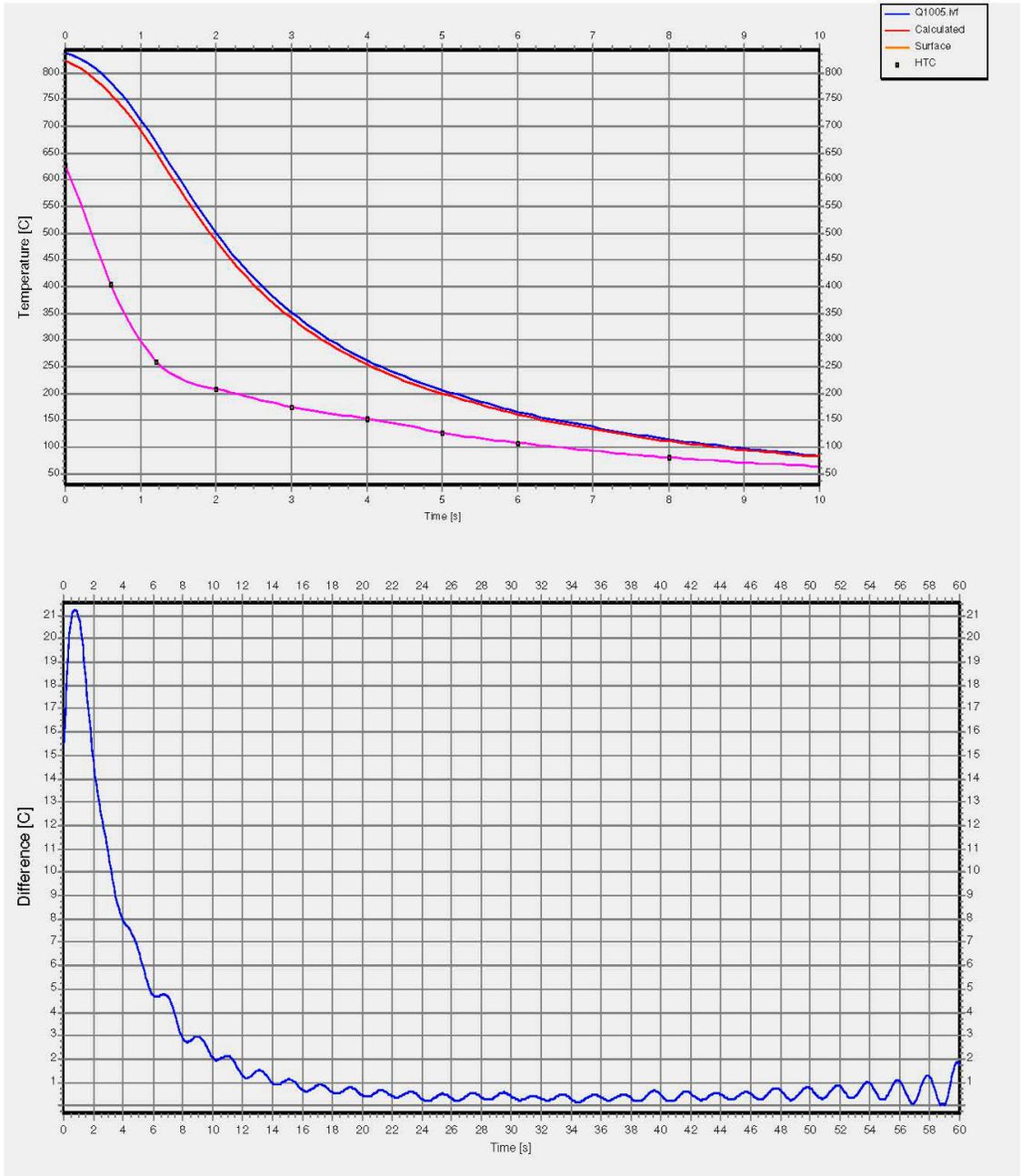
Date of report	16-Aug-18	Probe No.	1005
Report No.	2	Cooling curve name	Q1005.ivf
Date of test	10-Aug-18	Medium temp. [C]	27
Test site	fimelab	Medium conc. [%]	0
Operator	Jose Antonio	Agitation rate [m/s]	600 rpm
Approved	Rafael Mercado	HTC(T) file name	initial.htc
Comments	1000 rpm		



Temperature, C	HTC, W/m²K
628.5	3784.3
403.8	8126.0
260.4	9699.0
209.1	6030.3
175.6	4438.7
153.9	3063.6
127.1	3315.9
108.2	2732.3
80.6	2472.8
64.0	2038.6
47.1	1399.1
40.0	915.1
36.9	491.2
35.0	72.7
34.7	0.0
34.7	0.0

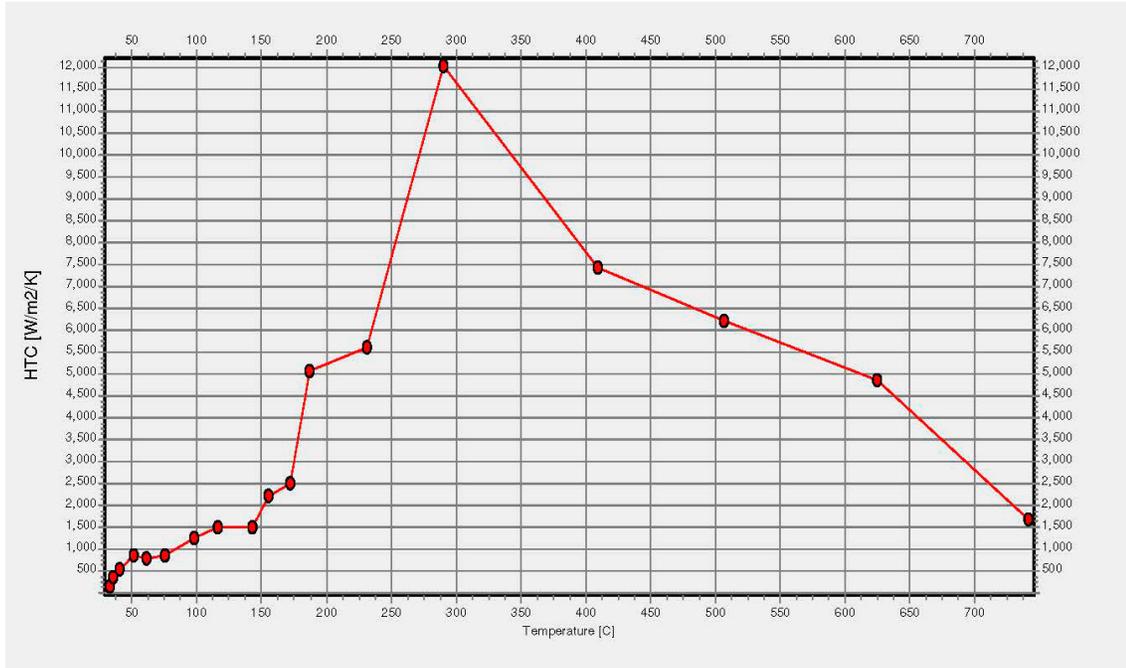
SQi Heat Transfer Calculation - Report

Date of report	16-Aug-18	Probe No.	1005
Report No.	2	Cooling curve name	Q1005.ivf
Date of test	10-Aug-18	Medium temp. [C]	27
Test site	firmelab	Medium conc. [%]	0
Operator	Jose Antonio	Agitation rate [m/s]	600 rpm
Approved	Rafael Mercado	HTC(T) file name	initial.htc
Comments	1000 rpm		



SQi Heat Transfer Calculation - Report

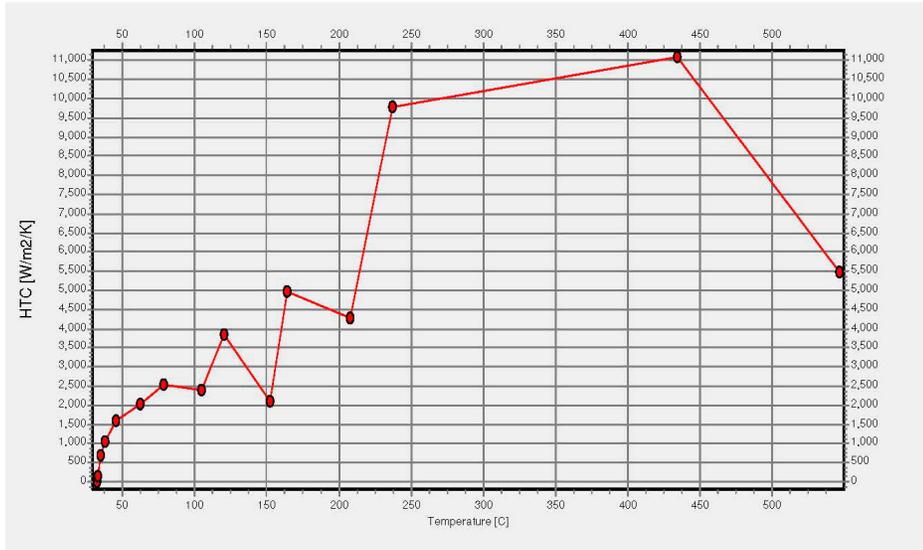
Date of report	16-Aug-18	Probe No.	1006
Report No.	3	Cooling curve name	Q1006.ivf
Date of test	10-Aug-18	Medium temp. [C]	27
Test site	finelab	Medium conc. [%]	0
Operator	Jose Antonio	Agitation rate [m/s]	a 200 rpm
Approved	Rafael Mercado	HTC(T) file name	initial.htc
Comments			



Temperature, C	HTC, W/m²K
741.6	1686.1
625.4	4844.5
506.8	6233.5
409.7	7430.3
290.6	12041.7
231.3	5609.9
187.3	5087.2
171.9	2512.1
155.2	2219.6
142.8	1503.0
116.7	1491.1
97.7	1241.1
75.3	856.6
61.6	771.6
51.3	841.3
40.7	530.2
35.3	373.7
33.1	143.0

SQi Heat Transfer Calculation - Report

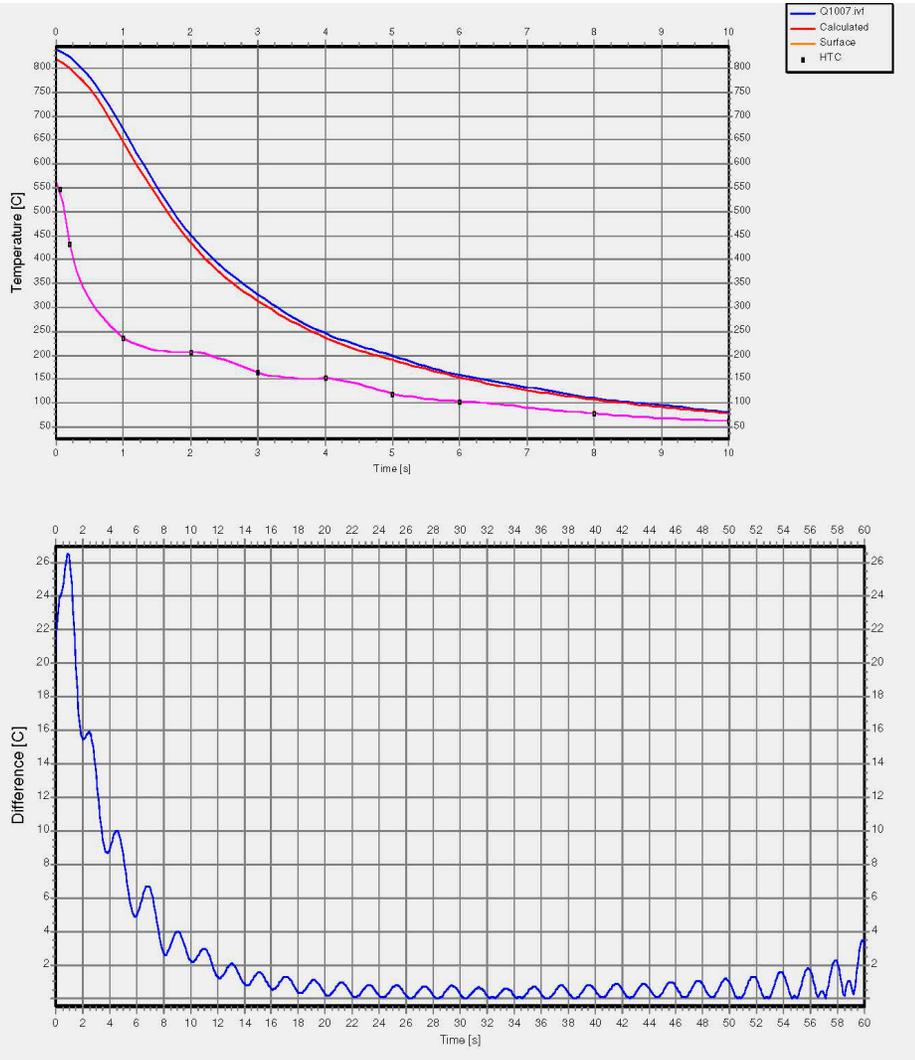
Date of report	25/09/2018	Probe No.	1007
Report No.		Cooling curve name	Q1007.ivf
Date of test	25/09/2018	Medium temp. [C]	27
Test site	fmelab	Medium conc. [%]	
Operator	Jose Antonio	Agitation rate [m/s]	1000
Approved	Rafael Mercado	HTC(T) file name	Q1007
Comments			



Temperature, C	HTC, W/m²K
546.5	5471.9
434.3	11083.7
237.1	9762.6
208.1	4281.6
163.9	4964.1
152.5	2115.6
120.2	3847.1
104.5	2382.2
78.3	2532.6
62.3	2023.3
45.3	1577.1
38.2	1054.4
34.9	678.9
32.8	127.5
32.5	0.0
32.5	0.0

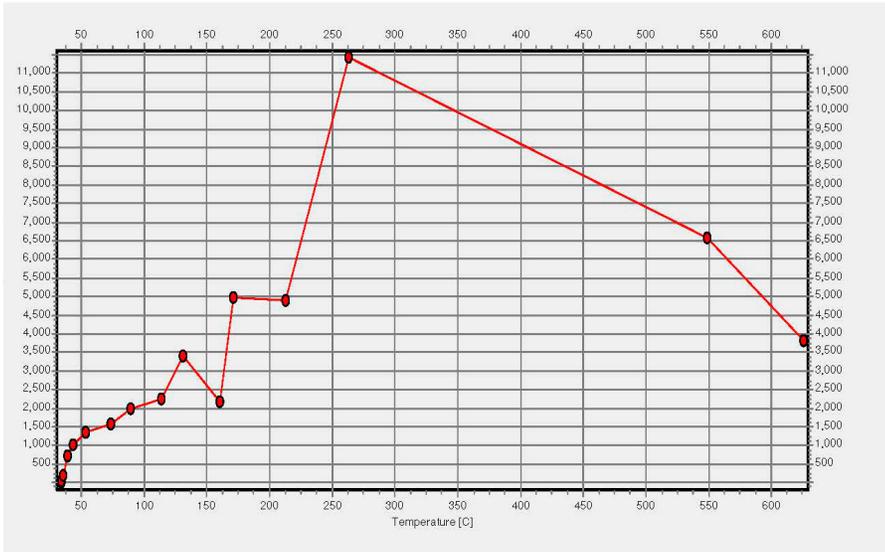
SQi Heat Transfer Calculation - Report

Date of report	25/09/2018	Probe No.	1007
Report No.		Cooling curve name	Q1007.ivf
Date of test	25/09/2018	Medium temp. [C]	27
Test site	fimelab	Medium conc. [%]	
Operator	Jose Antonio	Agitation rate [m/s]	1000
Approved	Rafael Mercado	HTC(T) file name	Q1007
Comments			



SQi Heat Transfer Calculation - Report

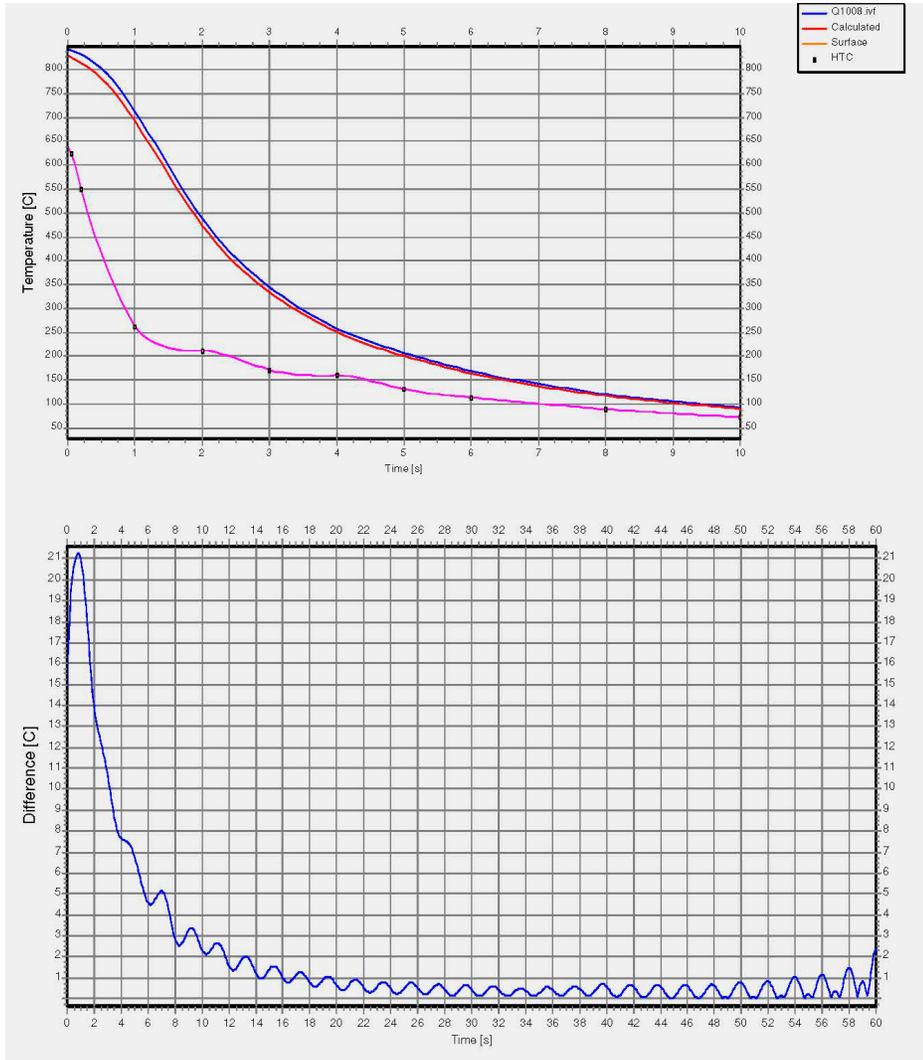
Date of report	25/09/2018	Probe No.	1008
Report No.		Cooling curve name	Q1008.ivf
Date of test	25/09/2018	Medium temp. [C]	27
Test site	fmelab	Medium conc. [%]	
Operator	Jose Antonio	Agitation rate [m/s]	600
Approved	Rafael Mercado	HTC(T) file name	Q1008.thtc
Comments			



Temperature, C	HTC, W/m²K
625.7	3807.2
548.6	6578.6
262.8	11428.6
212.9	4894.0
171.3	4965.8
160.2	2157.4
130.8	3382.6
114.1	2257.2
89.3	2001.7
73.3	1567.3
53.6	1344.8
43.8	1010.1
38.9	717.0
35.2	209.3
34.2	44.6
34.1	5.7

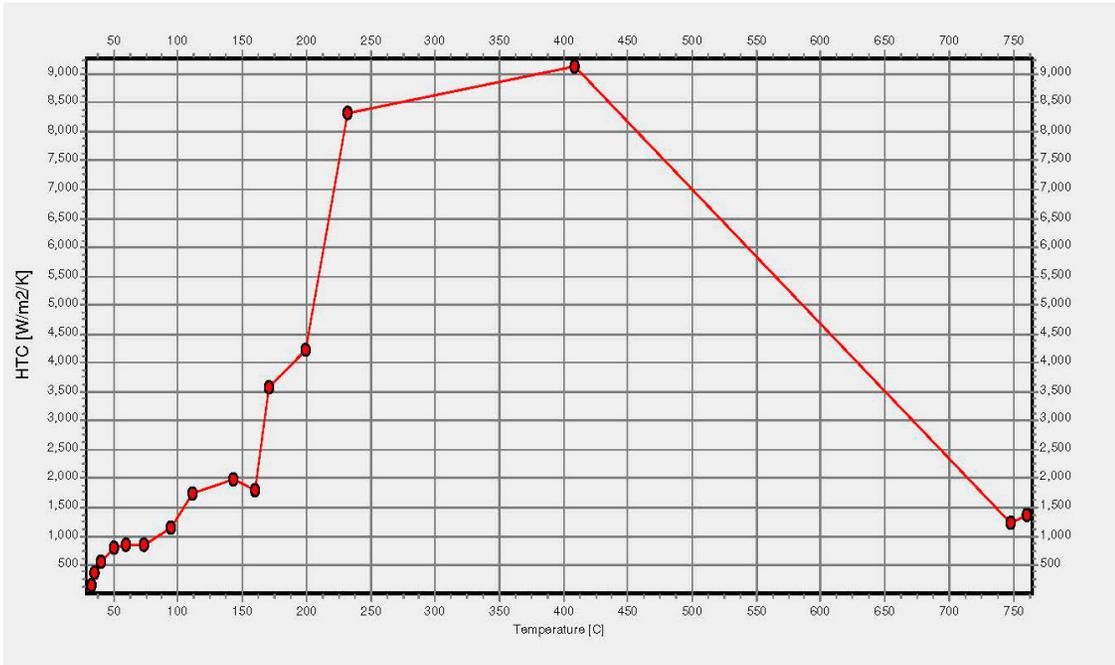
SQi Heat Transfer Calculation - Report

Date of report	25/09/2018	Probe No.	1008
Report No.		Cooling curve name	Q1008.ivf
Date of test	25/09/2018	Medium temp. [C]	27
Test site	fimelab	Medium conc. [%]	
Operator	Jose Antonio	Agitation rate [m/s]	600
Approved	Rafael Mercado	HTC(T) file name	Q1008.thtc
Comments			



SQi Heat Transfer Calculation - Report

Date of report	25/09/2018	Probe No.	1009
Report No.		Cooling curve name	Q1009.ivf
Date of test	25/09/2018	Medium temp. [C]	27
Test site	fimelab	Medium conc. [%]	
Operator	Jose Antonio	Agitation rate [m/s]	200
Approved	Rafael Mercado	HTC(T) file name	joseinital.htc
Comments			



Temperature, C	HTC, W/m²K
760.5	1354.1
747.6	1240.7
409.0	9129.0
232.0	8316.7
199.1	4221.6
171.2	3572.8
160.2	1806.3
143.0	1996.8
111.7	1749.8
94.9	1151.5
73.9	854.1
59.9	853.2
50.2	798.2
40.1	550.3
34.9	358.7
32.7	151.9

SQi Heat Transfer Calculation - Report

Date of report	25/09/2018	Probe No.	1009
Report No.		Cooling curve name	Q1009.ivf
Date of test	25/09/2018	Medium temp. [C]	27
Test site	finelab	Medium conc. [%]	
Operator	Jose Antonio	Agitation rate [m/s]	200
Approved	Rafael Mercado	HTC(T) file name	joseinital.htc
Comments			

