

INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL  
CENTRO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA  
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA APLICADA Y TECNOLOGÍA  
AVANZADA

ANALISIS DE FLUJO EN UN SENSOR DE PLACA DE  
ORIFICIO

TESIS

QUE PRESENTA:

ING. AARÓN ALMARAZ GÓMEZ

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN TECNOLOGÍA AVANZADA

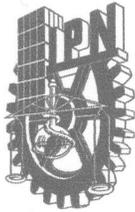
DIRECTOR:

DR. GABRIEL PLASCENCIA BARRERA

CO - DIRECTOR:

DR. MIGUEL A. BARRON MEZA

DICIEMBRE 2007



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

## SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

### ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 11:00 horas del día 22 del mes de enero del 2008 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICATA-IPN para examinar la tesis de titulada:  
Análisis de flujo en un sensor de placa de orificio

Presentada por el alumno:

Almaraz  
Apellido paterno

Gómez  
materno

Aarón  
nombre(s)

Con registro: 

B	0	5	1	5	6	9
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

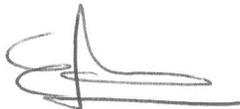
Maestro en Tecnología Avanzada

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA

  
Director de tesis

Dr. Gabriel Plascencia Barrera



Dr. Ernesto Marín Moares



Dr. Teodoro Rivera Montalvo

Co-Director de Tesis



Dr. Miguel Ángel Barrón Meza

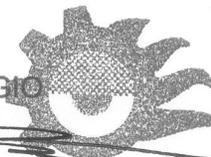


Dr. Geonel Rodríguez Gattorno

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO



Dr. José Antonio Irán Díaz  
Góngora

  
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA  
APLICADA Y TECNOLOGÍA AVANZADA  
DEL IPN

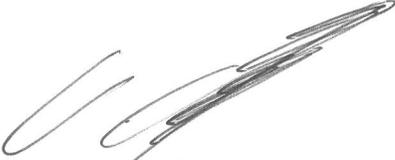


**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*CARTA CESION DE DERECHOS*

En la Ciudad de México, D.F. el día 7 del mes Febrero del año 2008, el (la) que suscribe Aarón Almaraz Gómez alumno (a) del Programa de Maestría en Tecnología Avanzada con número de registro B051569, adscrito a CICATA LEGARIA / CIITEC AZCAPOTZALCO, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. Gabriel Plascencia Barrera y Dr. Miguel A. Barrón Meza cede los derechos del trabajo intitulado Análisis de Flujo en un Sensor de Placa de Orificio, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección aaron8340@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

  
\_\_\_\_\_  
Aarón Almaraz Gómez

Nombre y firma

## **AGRADECIMIENTOS**

A Mamá, Mayra, Ingrid por el apoyo y comprensión que me han brindado.

Al Dr. Gabriel Plascencia por el apoyo, paciencia, guía y tiempo dedicado para el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Miguel A. Barrón Meza por el apoyo y colaboración en la realización de este trabajo.

Al Centro de Investigación e Innovación Tecnológica por haberme dado la oportunidad de formar parte de esta comunidad. Además del apoyo brindado para el desarrollo del trabajo.

Al Depto. De Ciencia de Materiales de Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco

A Lubricantes y Repuestos, S.A. de C.V., por el apoyo, comprensión y la amistad que se me ha brindado durante mis estudios profesionales y de posgrado.

Al personal del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de ESIME – Azcapotzalco por la amistad y consejos brindados.

A mis nuevos amigos, Isaac, César, Obed y Juan Carlos por el apoyo y amistad hacia mi persona.

A CONACYT por el apoyo económico otorgado.

Al IPN (COFAA) por el apoyo brindado mediante los proyectos SIP 20071343 y 20061179

## **RESUMEN**

La placa de orificio es un sensor de medición de flujo muy utilizado en diferentes procesos industriales, debido a que es económico, de fácil fabricación, instalación, bajo costo de mantenimiento y puede medir flujo de fluidos compresibles e incompresibles. Sin embargo, presenta las desventajas de inducir caídas de presión, además es menos preciso en comparación con otros medidores de flujo existentes.

Debido a lo anterior, mediante el análisis numérico y experimental del flujo de fluidos a través del sensor de placa de orificio, se busca mejorar la precisión en la medición de flujo con este dispositivo, proponiendo factores de corrección, cambios en el diseño de la geometría de la placa de orificio, localización de las tomas de presión o una combinación de de las opciones anteriores.

## **ABSTRACT**

The orifice plate is a flow sensor commonly used in the industry. It's wide acceptance is due to several factors, among them it's low maintenance cost and easy installation, however, due to it's simplicity, this type of flowmeter induces several errors and inaccuracies at the moment of actually measure flow.

To improve the accuracy of the orifice plate sensor, a numerical and experimental analysis of fluid flow is carried out. Results show that correction factors are needed as well as changing the measurement points in order to improve the efficiency of the plate meter.

## LISTA DE FIGURAS

No.	PIE DE FIGURA	Página
2.1	Medidor de flujo de área variable (Rotámetro)	19
2.2	Medidor de flujo tipo turbina	19
2.3	Medidor de flujo tipo ultrasónico	20
2.4	Medidor de flujo tipo electromagnético	21
2.5	Sensor de placa de orificio	22
2.6	Medidor de flujo de tubo Venturi	22
3.1	Diagrama del proceso de simulación numérica	27
3.2 a	Dibujo de la geometría en 2D	28
3.2 b	Dibujo de la geometría en 3D	28
3.3 a	Malla estructurada en 2D	29
3.3 b	Malla no estructurada en 2D	29
3.4	Generación de la malla en 2D en la placa y la sección anterior a ella.	30
3.5	Residuales de la simulación numérica en 3D a 5s de flujo. Velocidad de entrada de 1.138 m/s ( $Re = 50000$ ). Modelo $k - \epsilon$	34
3.6	Localización de los puntos para el cálculo de la presión estática en la simulación numérica.	35
3.7	Comparación entre el flujo calculado con la integración del perfil de velocidad y el flujo calculado con la diferencia de presión para la placa de orificio de 0.023 m de espesor con ángulo a la descarga Modelo ( $k - \epsilon$ y RSM)	36
3.8	Comparación entre el flujo calculado con la integración del perfil de velocidad y el flujo calculado con la diferencia de presión para la placa de orificio de 0.023 m de espesor sin ángulo a la descarga Modelo ( $k - \epsilon$ y RSM)	37
3.9	Velocidad a lo largo de la tubería a 5 s de flujo. Modelo $k - \epsilon$ a diferentes radios	38
3.10	Velocidad máxima a lo largo de la tubería a 5 s. de flujo. Modelos $k - \epsilon$ y RSM	39
3.11 a	Líneas de flujo a través de la placa de orificio. Modelo $k - \epsilon$	39
3.11 b	Líneas de flujo a través de la placa de orificio. Modelo RSM	39
3.12 a	Residuales de la simulación numérica en 2D a 5 s de flujo Velocidad de entrada de 1.138 m/s ( $Re = 50000$ ) Modelo $k - \epsilon$	40

5.8	Sistema de descarga y medición de flujo real	64
5.9	Corte transversal de una placa de orificio	65
5.10	Placa de orificio de 0.0015 m de espesor sin ángulo a la descarga	66
6.1	Medición de flujo con la placa de orificio de 0.0015 m de espesor sin ángulo a la descarga	71
6.2	Medición de flujo con la placa de orificio de 0.0015 m de espesor con ángulo a la descarga	72
6.3	Medición de flujo con las placas de orificio de 0.0015 m de espesor con y sin ángulo de 45° a la descarga	73
6.4	Medición de flujo con la placa de orificio de 0.023 m de espesor sin ángulo a la descarga	74
6.5	Medición de flujo con la placa de orificio de 0.023 m de espesor con ángulo a la descarga	75
6.6	Líneas de tendencia de medición de flujo con diferentes placas de orificio con las tomas de presión 3	76
6.7	Pérdida de presión debido al paso del flujo a través de la placa de orificio	79
6.8 a	Porcentaje de desviación del flujo medido con la placa de orificio y el flujo real con las diferentes tomas de presión	82
6.8 b	Desviación del flujo real para la placa de 0.0015 m de espesor con ángulo a la descarga	82
6.8 c	Desviación del flujo real para la placa de 0.023 m de espesor sin ángulo a la descarga	82
6.9	Sección de la tubería donde se ubican las tomas de baja presión	84
6.10	Medición de flujo mediante simulación numérica y experimentación (Placa de orificio de 0.0015 m de espesor con ángulo a la descarga)	85
6.11	Medición de flujo mediante simulación numérica y experimentación (Placa de orificio de 0.023 m de espesor sin ángulo a la descarga)	86
6.12	Medición de flujo mediante simulación numérica y experimentación (Placa de orificio de 0.023 m de espesor con ángulo a la descarga)	87
6.13 a	Medición de flujo mediante simulación numérica y experimentación con la placa de orificio de 0.0015 m de espesor con ángulo a la descarga en las tomas de presión 1	88
6.13 b	Medición de flujo mediante simulación numérica y experimentación con la placa de orificio de 0.023 m de espesor sin ángulo a la descarga en las tomas de presión 1	88
6.13 c	Medición de flujo mediante simulación numérica y experimentación con la placa de orificio de 0.023 m de espesor con ángulo a la descarga en las tomas de presión 1	88

5.8	Sistema de descarga y medición de flujo real	64
5.9	Corte transversal de una placa de orificio	65
5.10	Placa de orificio de 0.0015 m de espesor sin ángulo a la descarga	66
6.1	Medición de flujo con la placa de orificio de 0.0015 m de espesor sin ángulo a la descarga	71
6.2	Medición de flujo con la placa de orificio de 0.0015 m de espesor con ángulo a la descarga	72
6.3	Medición de flujo con las placas de orificio de 0.0015 m de espesor con y sin ángulo de 45° a la descarga	73
6.4	Medición de flujo con la placa de orificio de 0.023 m de espesor sin ángulo a la descarga	74
6.5	Medición de flujo con la placa de orificio de 0.023 m de espesor con ángulo a la descarga	75
6.6	Líneas de tendencia de medición de flujo con diferentes placas de orificio con las tomas de presión 3	76
6.7	Pérdida de presión debido al paso del flujo a través de la placa de orificio	79
6.8 a	Porcentaje de desviación del flujo medido con la placa de orificio y el flujo real con las diferentes tomas de presión	82
6.8 b	Desviación del flujo real para la placa de 0.0015 m de espesor con ángulo a la descarga	82
6.8 c	Desviación del flujo real para la placa de 0.023 m de espesor sin ángulo a la descarga	82
6.9	Sección de la tubería donde se ubican las tomas de baja presión	84
6.10	Medición de flujo mediante simulación numérica y experimentación (Placa de orificio de 0.0015 m de espesor con ángulo a la descarga)	85
6.11	Medición de flujo mediante simulación numérica y experimentación (Placa de orificio de 0.023 m de espesor sin ángulo a la descarga)	86
6.12	Medición de flujo mediante simulación numérica y experimentación (Placa de orificio de 0.023 m de espesor con ángulo a la descarga)	87
6.13 a	Medición de flujo mediante simulación numérica y experimentación con la placa de orificio de 0.0015 m de espesor con ángulo a la descarga en las tomas de presión 1	88
6.13 b	Medición de flujo mediante simulación numérica y experimentación con la placa de orificio de 0.023 m de espesor sin ángulo a la descarga en las tomas de presión 1	88
6.13 c	Medición de flujo mediante simulación numérica y experimentación con la placa de orificio de 0.023 m de espesor con ángulo a la descarga en las tomas de presión 1	88

A-1a	Placa de Orificio de 0.0015 m de espesor con ángulo de 45° a la descarga	I
A-1b	Placa de Orificio de 0.023 m de espesor sin ángulo a la descarga	I
A-1c	Placa de Orificio de 0.023 m de espesor con ángulo de 45° a la descarga	II

## LISTA DE TABLAS

No.	TÍTULO	Página
3.1	Velocidades de entrada de la tubería utilizados en 2D y 3D	31
3.2	Propiedades físicas del agua y aire	32
3.3	Valores del número de Fourier Fo para los cálculos numéricos para las tres dimensiones	33
3.4	Resultados de simulación numérica en 2D con la placa de 0.023 m de espesor con ángulo de 45° a la descarga	36
3.5	Resultados de simulación numérica en 2D con la placa de 0.023 m de espesor sin ángulo de 45° a la descarga	37
3.6	Resultados de simulación numérica en 3D con la placa de 0.023 m de espesor con ángulo de 45° a la descarga	44
3.7	Resultados de simulación numérica en 3D con la placa de 0.023 m de espesor sin ángulo de a la descarga	44
3.8	Resultados de simulación numérica en 3D con la placa de 0.0015 m de espesor con ángulo de 45° a la descarga	44
4.1	Representación de la relación entre la longitud de entrada y el diámetro de tubería para obtener un flujo totalmente desarrollado	49
5.1	Posición de la válvula correspondiente a números de Reynolds aproximados	67
6.1	Placas de orificio utilizadas para la medición de flujo	70
6.2	Coefficientes de descarga	79
6.3	Factores de corrección para la medición de flujo con las placas diseñadas para este trabajo.	91
B.1	Determinación de los coeficientes de descarga tabulados en la norma ISO 5167-2	III
C.1	Resultados experimentales obtenidos de la placa de orificio 1	IV
C.2	Resultados experimentales obtenidos de la placa de orificio 2	VII
C.3	Resultados experimentales obtenidos de la placa de orificio 3	X
C.4	Resultados experimentales obtenidos de la placa de orificio 4	XIII

## INDICE

AGRADECIMIENTOS	i
RESUMEN	ii
ABSTRACT	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABLAS	viii
CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 2. ANTECEDENTES TEÓRICOS	3
2.1 TIPO DE FLUJOS	3
2.2 ANÁLISIS DIFERENCIAL	5
2.2.1 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD	5
2.2.2 ECUACIÓN DE MOMENTUM	6
2.2.3 ECUACIONES DE NAVIER - STOKES	7
2.3 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL Y MODELOS DE TURBULENCIA	10
2.4 DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN DE FLUJO	18
2.4.1 TIPOS DE MEDIDORES DE FLUJO	18
2.5 REFERENCIAS	23
CAPÍTULO 3. SIMULACIÓN NUMÉRICA	25
3.1 DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA	27
3.2 GENERACIÓN DEL MALLADO DEL ESPACIO DEL ESPACIO COMPUTACIONAL	28
3.3 CONDICIONES INICIALES Y CONDICIONES DE DE FRONTERA	30
3.4 SIMULACIONES EN 2D	34
3.5 RESULTADOS DE SIMULACIÓN NUMÉRICA EN 2D	35
3.6 SIMULACIONES EN 3D	40
3.7 RESULTADOS DE SIMULACIÓN NUMÉRICA EN 3D	43
3.8 RESUMEN	46
3.9 REFERENCIAS	47

<b>CAPÍTULO 4. DISEÑO DE EXPERIMENTOS</b>	<b>48</b>
<b>4.1 LONGITUD DE ENTRADA DE FLUJOS TOTALMENTE DESARROLLADOS</b>	<b>48</b>
<b>4.2 DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD DE ENTRADA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE CAPA LÍMITE</b>	<b>51</b>
<b>4.3 DISEÑO DE LA INSTALACIÓN</b>	<b>56</b>
<b>4.4 DISEÑO DE LA INSTALACIÓN SEGÚN LA NORMA ISO 5167-2</b>	<b>56</b>
<b>4.5 RESUMEN</b>	<b>57</b>
<b>4.6 REFERENCIAS</b>	<b>57</b>
<b>CAPÍTULO 5. EXPERIMENTACIÓN</b>	<b>59</b>
<b>5.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO</b>	<b>59</b>
<b>5.2 DISEÑO DE LAS PLACAS DE ORIFICO</b>	<b>64</b>
<b>5.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>66</b>
<b>5.4 REFERENCIAS</b>	<b>68</b>
<b>CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>69</b>
<b>6.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES</b>	<b>70</b>
<b>6.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES VS. SIMULACIÓN NUMÉRICA</b>	<b>84</b>
<b>6.3 FACTORES DE CORRECCIÓN</b>	<b>91</b>
<b>6.4 RESUMEN</b>	<b>92</b>
<b>6.5 REFERENCIAS</b>	<b>93</b>
<b>CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES</b>	<b>95</b>
<b>APÉNDICE A. DIAGRAMAS DE LAS PLACAS DE ORIFICIO DISEÑADAS PARA ESTE TRABAJO</b>	<b>I</b>
<b>APÉNDICE B. DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE DESCARGA TABULADOS EN LA NORMA ISO 5167-2</b>	<b>III</b>
<b>APÉNDICE C. RESULTADOS EXPERIMENTALES</b>	<b>IV</b>

## **CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN**

La placa de orificio es un sensor de medición de flujo muy utilizado en la industria en el control de procesos, en los balances energéticos de plantas industriales, en la cuantificación de emisiones de contaminantes, en actividades de metrología legal, entre otros. Este tipo de sensor tiene como ventajas principales: su bajo costo de fabricación y mantenimiento, fácil instalación, además se pueden medir flujos de gases y líquidos; sin embargo, su principal desventaja es el bajo grado de exactitud que presenta en comparación con otros medidores de flujo. Por lo tanto se busca que mediante un análisis adecuado del flujo se puede mejorar a través de factores de corrección la precisión de este instrumento.

La fabricación e instalación de las placas de orificio se basa en la norma ISO 5167-2. Sin embargo, para este trabajo se diseñaron placas de orificio con diferentes características geométricas, ya que se utilizó un espesor de la placa mayor al recomendado por la norma ISO 5167-2. También en algunas placas se eliminó el ángulo a la descarga de la placa recomendado por tal norma.

En este trabajo se muestra el análisis realizado al flujo volumétrico en una tubería circular que pasa a través del sensor de medición de flujo de placa de orificio. Este análisis consta de simulación numérica, así como de determinaciones experimentales.

Para el diseño de la instalación experimental, se realizó un análisis teórico de la capa límite para flujo laminar y para flujo turbulento con el fin de determinar la longitud de tubería recta necesaria para lograr el total desarrollo del flujo al pasar por el sensor de placa de orificio.

Además, se utilizaron diferentes posiciones de tomas de presión recomendadas por la norma.

Como ya se indicó, la medición correcta del flujo de fluidos es de gran importancia para algunos procesos industriales (alimentaria, farmacéutica, petrolera, refinación de metales, entre otras). Por tal motivo, la selección eficaz

de un medidor de flujo volumétrico es de gran importancia, exige un conocimiento de los principios de funcionamiento del medidor, además de un conocimiento profundo del proceso y de las características del flujo a medir, ya que en la mayor parte de los problemas de medición de flujo se obtienen resultados imprecisos debido al inadecuado análisis de diversos factores del fluido como son variaciones de presión, densidad, viscosidad y velocidad del fluido, además, la predicción correcta del flujo turbulento es uno de los grandes problemas de la ingeniería que no se ha resuelto.

Por lo tanto, mediante el análisis numérico y experimental del comportamiento del flujo de fluidos a través de un sensor de placa de orificio, mejorar la precisión en la medición de flujo con este dispositivo, ya sea proponiendo factores de corrección, proponiendo cambios en el diseño de la placa de orificio, en la metodología de medición que recomienda la normatividad existente o una combinación de las opciones anteriores. Ya que este sensor de medición de flujo en general es económico y se utiliza en diferentes procesos industriales, sin embargo, presenta una menor exactitud en la medición de flujo en comparación con otros medidores existentes en el mercado, sobre todo cuando se requiere medir flujos turbulentos.

## **CAPITULO 2. ANTECEDENTES TEORICOS**

Actualmente existe una gran variedad de medidores de flujo, los cuales presentan diferentes ventajas y desventajas. Para su selección adecuada se debe tener en cuenta las características del flujo que se requiere medir, así como el tipo de fluido, precisión requerida y el costo del medidor.

Como se mencionó anteriormente, en este trabajo se analiza el flujo a través del sensor de placa de orificio para mejorar la precisión de la medición con este dispositivo, por lo tanto se requiere comprender el comportamiento del flujo que pasa a través de este instrumento, haciendo uso de las ecuaciones que describen el flujo de los fluidos aplicadas a un volumen diferencial de fluido.

Por otro lado, la dificultad para resolver analíticamente las ecuaciones que describen el comportamiento del flujo de fluidos lleva a la necesidad de utilizar modelos matemáticos para aproximar las soluciones de tales ecuaciones con el fin de caracterizar al flujo.

### **2.1 TIPO DE FLUJOS**

Los fluidos son sustancias cuya estructura molecular no presenta resistencia al esfuerzo cortante, por lo que adquieren la forma del recipiente que los contiene, es decir, un fluido se deforma de manera continua cuando se aplica un esfuerzo cortante, de magnitud proporcional a la viscosidad del mismo.

Por otra parte, los fluidos se pueden clasificar en newtonianos y no newtonianos. En los primeros, existe una relación lineal entre la magnitud del esfuerzo cortante aplicado y la razón de deformación angular. Los gases y los líquidos más comunes tienden a comportarse de esta manera [1].

En cuanto al flujo, hay diferentes maneras de clasificar al flujo de fluidos, puede ser dependiendo de la estructura del flujo (laminar o turbulento) o de la situación física que rodea al fluido (interno o externo), entre otros.

Sin embargo, la manera más común de clasificar a los flujos es mediante el número de Reynolds, el cual relaciona las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas que actúan sobre un fluido en movimiento.

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (1)$$

Donde:

$Re$  = Número de Reynolds,  $\rho$  = Densidad del fluido ( $\text{kg/m}^3$ ),  $D$  = Diámetro interior de la tubería (m);  $\mu$  = Viscosidad dinámica del fluido ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ );  $u$  = Velocidad (m/s)

Un flujo dentro de una tubería de sección circular es laminar cuando el número de Reynolds es menor o igual a 2300. Este tipo de flujo tiene la característica de que el flujo se desarrolla en trayectorias uniformes acomodadas una sobre otra de manera ordenada en forma de láminas.

Cuando el número de Reynolds excede 4500, el flujo es turbulento. Este tipo de flujo es el más común en los procesos industriales. En este, la trayectoria de las partículas de fluido es errática y se tiene la presencia de remolinos de diferentes escalas, que presentan variaciones de momentum y energía dependientes del tiempo.

Entre valores de Reynolds de 2300 a 4500 existe una etapa de transición, en la que se pueden presentar características de ambos tipos de flujo.

Por otra parte, dependiendo de la geometría donde se transporte el fluido, rugosidad de la superficie, velocidad del flujo, temperatura de la superficie y el tipo de fluido, los valores de Reynolds que determinan la transición del régimen laminar al turbulento cambian [2].

## 2.2 ANALISIS DIFERENCIAL

Cuando se requiere realizar un análisis detallado del comportamiento de un flujo, se requiere considerar el comportamiento local del mismo, lo cual se puede hacer mediante la utilización de elementos diferenciales de volumen de fluido. Esta aproximación lleva a un conjunto de ecuaciones diferenciales que describen a detalle el movimiento del fluido.

### 2.2.1 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD.

El concepto de conservación de la masa es de gran importancia para la mecánica de fluidos ya que este concepto indica que la variación de la masa contenida en una unidad de volumen en el tiempo debe ser cero, es decir, la cantidad de masa que entra al sistema debe ser la misma cantidad de masa que sale del sistema. Por lo tanto, este principio se debe mantener sin importar el tipo de consideraciones que se hayan hecho para el cálculo, así como la configuración geométrica por la cual se mueve el fluido, es decir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2)$$

Donde el primer término representa la variación de la masa contenida por unidad de volumen en el tiempo, el segundo término representa el flujo de masa por convección hacia o desde un punto. Por lo tanto para flujos incompresibles, es decir, cuya densidad es constante, la ecuación (2) se reduce a:

$$(\mathbf{u} \cdot \nabla) = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Esta expresión indica que al considerarse un fluido como incompresible, la velocidad de la deformación unitaria del volumen es nula.

## 2.2.2. ECUACIÓN DE MOMENTUM

El principio de conservación de la cantidad de movimiento para un volumen de fluido dice que la variación en el tiempo de la cantidad de movimiento es igual a la resultante de las fuerzas de cuerpo y de superficie que actúan en el volumen. Este principio se expresa mediante la siguiente ecuación de balance de fuerzas:

$$\sum F = \int_A \rho u (u \cdot n) dA + \frac{d}{dt} \int_V \rho u dV \quad (4)$$

Las fuerzas a las que se encuentra sometido un volumen de fluido normalmente son fuerzas másicas y fuerzas de superficie. Las fuerzas másicas son debidas a fuerzas gravitacionales y las fuerzas de superficie se deben las fuerzas que cada porción de fluido ejerce sobre una porción adyacente a través de la superficie que los separa [3]. Por lo tanto la ecuación (4) se puede reescribir de la siguiente manera:

$$\int_A \rho u (u \cdot n) dA + \frac{d}{dt} \int_V \rho u dV = \underbrace{\int_V \rho g dV}_{\text{Fuerzas másicas}} + \underbrace{\int_A (\tau + P) \cdot n dA}_{\text{Fuerzas de superficie}} \quad (5)$$

Donde:

$\rho$  = densidad,  $u$  = velocidad,  $t$  = tiempo,  $V$  = Volumen,  $A$  = Superficie que cubre al volumen,  $n$  = vector normal  $\tau$  = Esfuerzo cortante,  $P$  = Presión

Para poder integrar la ecuación (5) es necesario convertir las integrales de superficie en integrales de volumen, para lo cual se hace uso del Teorema de la Divergencia de Gauss:

$$\int_V \vec{G} \cdot \vec{\nabla} dV = \int_A \vec{G} \cdot \vec{n} dA \quad (6)$$

De manera que la ecuación (5) se transforma en:

$$\int_V \nabla \cdot (\rho u \cdot u) dV + \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho u dV = \int_V \rho g dV + \int_V (\nabla P + \nabla \tau) dV \quad (7)$$

Mediante la integración de la ecuación (7) se obtiene la siguiente expresión:

$$\nabla \cdot (\rho u \cdot u) + \frac{\partial}{\partial t} \rho u = -\rho g - \nabla P + \nabla \cdot \tau \quad (8)$$

Donde  $\tau$  es el tensor de esfuerzos cortantes y el término  $\nabla \cdot \tau$  equivale a  $\mu \nabla^2 u$ .

El término  $\nabla \cdot (\rho u \cdot u)$  es la convección de momentum hacia o desde un punto.

El término  $\nabla P$  es la convección de momentum a partir de las fuerzas de presión.

El término  $\nabla \cdot \tau$  es la convección de momentum a partir de las fuerzas viscosas.

El término  $-\rho g$  es la convección de momentum debido a la fuerza gravitacional.

La ecuación (8) representa el balance microscópico de momentum, donde cada término determina el incremento de momentum por unidad de volumen.

### 2.2.3 ECUACIONES DE NAVIER – STOKES

Las ecuaciones de Navier – Stokes son una serie de ecuaciones que describen el movimiento de fluidos viscosos newtonianos. Estas ecuaciones son no lineales, en derivadas parciales de segundo orden y no existen soluciones generales a ellas [2].

Por otro lado, para poder expresar las variaciones de las propiedades del flujo en función del tiempo y espacio se hace uso del siguiente operador:

$$\frac{D}{Dt} = \left( \frac{\partial}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \right) \quad (9)$$

Donde  $\frac{D}{Dt}$  es la derivada sustancial que relaciona el cambio de una propiedad del fluido en función del tiempo y espacio. Por ejemplo, la velocidad  $\mathbf{u}$ , variará tanto en función del tiempo ( $t$ ) como la posición ( $x, y, z$ ) simultáneamente. El término  $\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}$  representa la variación de la velocidad  $\mathbf{u}$ , con respecto al tiempo  $t$  en un punto fijo, mientras que el término  $(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u}$  representa la variación de la velocidad de un punto material al cambiar de posición [3].

De lo anterior, la ecuación (8) puede reescribirse de la siguiente manera:

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \rho \mathbf{g} - \nabla P - \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (10)$$

Aplicando el producto punto entre la ecuación (10) y el vector velocidad resulta en:

$$\rho \frac{D(\mathbf{u} \cdot \mathbf{u})}{Dt} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla P) - (\mathbf{u} \cdot [\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}]) + \rho(\mathbf{u} \cdot \mathbf{g})$$

$$\rho \frac{D\left(\frac{u^2}{2}\right)}{Dt} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla P) - (\mathbf{u} \cdot [\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}]) + \rho(\mathbf{u} \cdot \mathbf{g})$$

$$\rho \frac{D\left(\frac{u^2}{2}\right)}{Dt} = -(\nabla \cdot P\mathbf{u}) - P(-\nabla \cdot \mathbf{u}) - [\nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{u})] - [-(\boldsymbol{\tau} \cdot \nabla \mathbf{u})] + \rho(\mathbf{u} \cdot \mathbf{g}) \quad (11)$$

En la ecuación (11) se expresa un balance microscópico de energía mecánica, la cual describe la rapidez con que la energía cinética cambia por unidad de volumen, mientras el fluido se mueve.

Donde:

$-\nabla \cdot Pu$  = Rapidez de trabajo hecho por unidad de volumen por las fuerzas de presión,  $-P(-\nabla \cdot u)$  = Rapidez de conversión reversible de la energía interna por unidad de volumen,  $-\nabla \cdot [\tau \cdot u]$  = Rapidez de trabajo realizado por fuerzas viscosas por unidad de volumen,  $-\nabla \cdot [\tau \cdot \nabla u]$  = Rapidez de conversión de la energía interna por unidad de volumen,  $\rho(u \cdot g)$  = Rapidez de trabajo realizado por fuerzas gravitatorias por unidad de volumen.

Aplicando la definición  $\tau = \mu \frac{du}{dx}$  a la ecuación (11), se tiene la siguiente ecuación:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u \right) = \rho g - \nabla P + \mu \nabla^2 u \quad (12)$$

La ecuación (12) es la representación vectorial de las ecuaciones de Navier - Stokes para flujo de fluidos incompresibles con viscosidad constante.

Esto significa que a su vez las ecuaciones de Navier - Stokes pueden ser expresadas en forma de componentes de la siguiente manera:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

(13)

Como se puede observar, debido a la no linealidad de estas ecuaciones, existe una variedad de posibles soluciones, tanto que estas ecuaciones no han sido resueltas de manera analítica general [1].

### **2.3 DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL Y MODELOS DE TURBULENCIA.**

La Dinámica de Fluidos Computacional (DFC) es la rama de la Mecánica de Fluidos que utiliza métodos numéricos para aproximar las soluciones de las ecuaciones de Navier – Stokes, las cuales describen el comportamiento del movimiento de los fluidos.

Para esto, se requieren métodos de discretización para aproximar tales soluciones mediante un sistema de ecuaciones algebraicas que pueden ser resueltas numéricamente. Tal aproximación es aplicada a pequeñas regiones del dominio en espacio y tiempo.

Existen diferentes métodos de discretización, por ejemplo el método de diferencias finitas, método de elemento finito, método de volumen finito, entre otros.

Para la aproximación de la solución de las ecuaciones diferenciales parciales que describen los fenómenos relacionados al flujo de fluidos se utilizan modelos matemáticos, también llamados modelos de turbulencia. Los modelos comúnmente empleados en DFC son los siguientes:

Los *Modelos RANS (Reynolds Average Navier-Stokes)*. Estos se basan en resolver las ecuaciones promediadas de Reynolds de conservación de masa, momentum y energía. Tales ecuaciones son promediadas en el tiempo. El utilizar este tipo de modelos, trae consigo la necesidad de agregar ecuaciones o correlaciones a las ecuaciones de Navier - Stokes ya que se tienen mayor número de incógnitas que de ecuaciones. Para fluidos incompresibles las ecuaciones RANS se pueden expresar como:

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (14)$$

Ecuaciones de Navier - Stokes (promediadas de Reynolds):

$$\rho \frac{DU_i}{Dt} = F_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \overline{\rho u_i u_j} \right] \quad (15)$$

Donde  $U_i$  y  $P$  representan el promedio de la velocidad, Temperatura y Presión,  $F_i$ , representa las fuerzas de cuerpo,  $u_i$ ,  $\rho$  y  $f_i$  representan sus fluctuaciones,  $\mu$  es la viscosidad dinámica. Los últimos términos en la ecuación 2 representan las variaciones de momentum. En la ecuación (15), el término  $-\overline{\rho u_i u_j} = \tau_{ij}^t$  es el tensor de esfuerzos turbulento [4].

El modelaje de las ecuaciones promediadas de Reynolds requiere un adecuado modelaje de los esfuerzos de Reynolds. La solución numérica a partir de este tipo de modelo, utiliza la hipótesis de Boussinesq [5] que dice que el tensor de esfuerzos puede ser expresado en términos de los gradientes de la velocidad del flujo principal, es decir, el tensor de esfuerzos de Reynolds en la ecuación de Navier – Stokes promediada en el tiempo puede ser sustituido por la viscosidad turbulenta multiplicada por los gradientes de velocidad [5].

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho \kappa + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (16)$$

Esta hipótesis es utilizada en los modelos de turbulencia Spalart-Allmaras,  $k - \varepsilon$ ,  $k - \omega$  [6].

En el caso de los modelos  $k - \varepsilon$  y  $k - \omega$  se requiere resolver dos ecuaciones de transporte adicionales, la ecuación de la energía cinética turbulenta  $k$ , su razón de disipación de energía  $\varepsilon$ , y en el caso del modelo  $k - \omega$ , la ecuación de  $\omega$ , la razón específica de disipación de la energía cinética turbulenta. Este tipo de aproximación tiene la desventaja de que considera a la viscosidad turbulenta como isotrópica, lo cual no necesariamente es correcto [6].

Dentro de los modelos RANS, los más utilizados son los siguientes:

El *Modelo  $k - \varepsilon$* , es un modelo semiempírico basado en modelar las ecuaciones de transporte de energía cinética turbulenta  $k$  y su tasa de disipación  $\varepsilon$ . La ecuación de transporte de la energía cinética es derivada directamente de la ecuación exacta, mientras que la ecuación para el modelaje de  $\varepsilon$ , es obtenida mediante razonamiento físico.

La ecuación exacta que define la dinámica de la energía cinética turbulenta  $k$  se describe a continuación [4]:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} \equiv \rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \rho \overline{f_i u_i} - \rho \overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial k}{\partial x_j} - \rho \overline{k u_j} - \overline{p u_i} \delta_{ij} \right) \quad (17)$$

Y la ecuación exacta de la razón de disipación de la energía cinética turbulenta e es la siguiente [7]:

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} P_\kappa \frac{\varepsilon}{\kappa} - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{\kappa} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \quad (18)$$

En este modelo, la viscosidad turbulenta se expresa como:

$$\mu_t = \rho C_\mu \sqrt{\kappa L} = \rho C_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (19)$$

$P_k = -\overline{\rho u_i u_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \approx \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$ , que es la razón de la producción de energía cinética turbulenta del flujo principal, es decir, la transferencia de energía cinética del flujo principal a la turbulencia.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] C_{\varepsilon 1} \frac{1}{2} [P_{ii} + C_{\varepsilon 3} G_{ii}] \frac{\varepsilon}{K} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{K} + S_\varepsilon \quad (20)$$

Donde:

$C_\mu = 0.09$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ,  $\sigma_K = 1.0$ ,  $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ ,  $C_{\varepsilon 3} = \tanh \left| \frac{v}{u} \right|$ . Son los coeficientes más comúnmente reportados en la literatura [4, 6]

El modelo  $k - \omega$  también se basa en modelar la ecuación de transporte de energía cinética turbulenta y su razón específica de disipación  $\omega$ . En este modelo la ecuación de  $k$  es resuelta. La ecuación  $\omega$  se usa para determinar longitud. Las ecuaciones modeladas de  $k$  y  $\omega$  quedan de la siguiente manera [5]:

$$(\rho \bar{U}_j k)_{,j} = \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) k_{,j} \right]_{,j} + P_k - \beta^* \varpi k \quad (21)$$

$$(\rho \bar{U}_j \varpi)_{,j} = \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varpi} \right) \varpi_{,j} \right]_{,j} + \frac{\varpi}{k} (c_{\varpi 1} P_k - c_{\varpi 2} \rho k \varpi) \quad (22)$$

Donde las constantes mas comunes reportadas [5] son:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\varpi}, \quad \varepsilon = \beta^* \varpi k; \quad \beta = 0.09, \quad c_{\omega 1} = 5/9, \quad c_{\omega 2} = 3/40, \quad \sigma_\omega = 2 \quad \text{y} \quad \sigma_k^{\varpi} = 2$$

En el *modelo RSM (Reynolds Stress Model)*, una ecuación de transporte para el tensor de esfuerzos, se deriva a partir de las ecuaciones de Navier – Stokes, con lo cual se requieren resolver 5 ecuaciones de transporte cuando se simulan flujos en 2D y 7 cuando se simulan flujos en 3D, ya que resuelve las ecuaciones de transporte de esfuerzos de Reynolds de la ecuación (15), junto con una ecuación de razón de disipación [6, 7].

La ecuación modelada de transporte de Reynolds queda de la siguiente manera [5]:

$$\begin{aligned}
 \underbrace{(\bar{U}_k \bar{u}_i \bar{u}_j)_{,k}}_{C_{ij}} &= \underbrace{-\bar{u}_i \bar{u}_k \bar{U}_{j,k} - \bar{u}_j \bar{u}_k \bar{U}_{i,k}}_{P_{ij}} + \underbrace{\frac{\bar{p}}{\rho} (u_{i,j} + u_{j,i})}_{\Phi_{ij}} \\
 &\quad - \underbrace{\left[ \bar{u}_i \bar{u}_j \bar{u}_k + \frac{\bar{p} u_j}{\rho} \delta_{ik} + \frac{\bar{p} u_i}{\rho} \delta_{jk} - \nu (\bar{u}_i \bar{u}_j)_{,k} \right]_{,k}}_{D_{ij}} \\
 &\quad - \underbrace{2\nu \bar{u}_{i,k} \bar{u}_{j,k}}_{\varepsilon_{ij}}
 \end{aligned} \tag{23}$$

Donde:

$P_{ij}$  = Producción de esfuerzos,  $\phi_{ij}$  = Deformación debido a la presión, el cual provoca la isotropía de la turbulencia,  $\varepsilon_{ij}$  = disipación de energía cinética turbulenta (transformación de energía mecánica en calor en los remolinos pequeños),  $C_{ij}$  = Convección de la energía cinética turbulenta y  $D_{ij}$  = Difusión de energía cinética turbulenta.

Debido a que el término de deformación debido a la presión no agrega ni destruye energía cinética turbulenta, únicamente distribuye la energía entre las componentes normales. Este término es modelado de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
\Phi_{ij} &= \Phi_{ij,1} + \Phi_{ij,2} + \Phi'_{ij,1} + \Phi'_{ij,2} \\
\Phi_{ij,1} &= -c_1 \frac{\varepsilon}{k} \left( \overline{u_i u_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right) \\
\Phi_{ij,2} &= -c_2 \left( P_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} P_k \right) \\
\Phi'_{nn,1} &= -2c'_1 \frac{\varepsilon}{k} \overline{u_n^2} f \\
\Phi'_{ss,1} &= c'_1 \frac{\varepsilon}{k} \overline{u_n^2} f \\
f &= \frac{k^{\frac{3}{2}}}{2.55 x_n \varepsilon}
\end{aligned} \tag{24}$$

Los términos  $\Phi'_{nn,1}$  y  $\Phi'_{ss,1}$  tienen la función de tomar los efectos debido a las paredes, donde los subíndices  $s$  y  $n$ , corresponden a las coordenadas a lo largo de la pared y normal a la pared respectivamente. Cerca de la pared, el esfuerzo normal es amortiguado, mientras aumenta los esfuerzos paralelos a la pared. [5]

La triple correlación en el término de difusión generalmente es modelada como se muestra a continuación:

$$D_{ij} = \left( c_s \rho \overline{u_k u_m} \frac{k}{\varepsilon} (\overline{u_i u_j})_{,k} \right)_{,m} \tag{25}$$

El tensor de disipación de energía cinética turbulenta se asume que sea isotrópico [5]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} \varepsilon. \tag{26}$$

El modelo *LES*, *Large Eddy Simulation*, (*Simulación de Remolinos Grandes*), se basa en resolver los remolinos grandes, mientras que los remolinos pequeños son modelados. Este modelo calcula las variaciones de las propiedades de los grandes remolinos debido a que éstos presentan un mejor transporte de momento, masa y energía, además de que son mucho más

energéticos que los remolinos pequeños. Las simulaciones con LES son en tres dimensiones y dependientes del tiempo, lo cual aumenta el tiempo de cómputo.

Primero se deben definir las escalas de los remolinos que se van a calcular, es decir, mediante un filtro, se “separan” los remolinos grandes para ser calculados.

Para lo cual existen diferentes métodos propuestos de filtrado, entre estos se cuenta con el filtrado de la velocidad en una dimensión [7]:

$$\bar{u}_i(x) = \int G(x, x') u_i(x') dx' \quad (27)$$

Donde:

$G(x, x')$  es el núcleo del filtro, existen diferentes tipos de filtros que pueden ser aplicados a LES. Estos filtros están asociados a la escala espacial del filtro  $\Delta$ , la cual no debe confundirse con el mallado del espacio computacional. Los remolinos de mayor tamaño que  $\Delta$  son considerados remolinos grandes, mientras que los remolinos menores que  $\Delta$  son remolinos pequeños los cuales deberán ser modelados.

Cuando las ecuaciones de Navier – Stokes para fluidos incompresibles son filtradas, se obtienen ecuaciones parecidas a las RANS [5]:

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \overline{u_i u_j})}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (28)$$

La ecuación de continuidad queda de la siguiente manera:

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (29)$$

Debido a que la ecuación de continuidad es lineal, el filtrado de esta ecuación no la modifica significativamente [7]. Sin embargo es importante considerar que:

$$\overline{u_i u_j} \neq \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (30)$$

El término de la izquierda es difícil calcular, por lo cual debe modelar una aproximación para la diferencia entre los miembros de la desigualdad:

$$\tau_{ij}^S = -\rho \left( \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \right) \quad (31)$$

Este nuevo miembro se llama Esfuerzo de Reynolds a escala de la submalla. Este término representa el cambio de momentum de los grandes remolinos causado por la acción de los remolinos pequeños o no resueltos.

Las simulaciones mediante *SND (Simulación Numérica Directa)*, proporcionan datos más exactos de los flujos turbulentos, éste método de solución resuelve las ecuaciones de Navier – Stokes sin realizar promedios ni aproximaciones. Recordando que los flujos turbulentos presentan variaciones momentum en tres dimensiones y en el tiempo, este modelo únicamente es aplicable en 3D. En este tipo de simulaciones, se calculan directamente los remolinos grandes y pequeños.

Para obtener resultados exactos se requiere que el espacio computacional grande en el que quepan los remolinos de gran escala del flujo, además el mallado de este espacio debe ser muy fino para que los remolinos pequeños puedan ser calculados. El tamaño del elemento de la malla no debe ser mayor que los remolinos de tamaño de la escala de Kolmogorov, la cual es el tamaño de remolino más pequeño asociado a la disipación de energía [5, 7]

Al tener mallados espaciales muy finos  $\Delta x$  se requiere poner especial atención en el intervalo de tiempo  $\Delta t$  con el fin de mantener la estabilidad del cálculo numérico. Para lo cual se utiliza el número de Fourier  $Fo$ , que relaciona el

tamaño de paso y la distancia entre nodos. Para la simulación de flujos en 3D

$$Fo \geq \frac{1}{6}.$$

$$Fo = \nu \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad (32)$$

Donde:

$Fo$  = Número de Fourier,  $\Delta t$  = Tamaño de paso,  $\Delta x$  = Distancia entre nodos,  $\nu$  = Viscosidad cinemática

Los datos obtenidos con SND contienen información muy detallada del flujo, sin embargo, en ocasiones proporciona información que no es de utilidad para problemas de ingeniería, además es muy costoso para ser empleado de manera común.

## 2.4 DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN DE FLUJO

En la actualidad existen diferentes clases de medidores de flujo. Para su selección, se deben tener en cuenta diferentes factores como son precisión requerida, costo, facilidad de instalación y mantenimiento, tipo de flujo y fluidos que se desean medir. Cada tipo de medidor de flujo presenta diferentes principios de operación y funcionamiento. En la sección 2.4.1 se describen algunos de los medidores de flujo comúnmente utilizados.

### 2.4.1 TIPOS DE MEDIDORES DE FLUJO.

*Medidores de área variable.* Este tipo de medidores de flujo se caracterizan por el cambio de área que se produce entre el elemento primario en movimiento (flotador) y el cuerpo del medidor. En los rotámetros el flotador cambia de posición dependiendo del flujo y del empuje del fluido sobre el flotador. Tal flujo depende de la densidad y viscosidad del fluido y de los valores de la altura que alcance el flotador dentro del cuerpo del medidor, ya que la misma cambia

según se encuentre el punto de equilibrio del flotador. Este medidor de flujo tiene una exactitud de 2%.



Figura 2.1 Medidor de flujo de área variable (Rotámetro) [12]

Para la medición de flujo en canales abiertos, se utilizan los *vertederos*, los cuales pueden tener diferentes formas que generan una diferencia de alturas del líquido en el canal entre la zona anterior del vertedero y el punto más bajo del mismo. Midiendo esta diferencia de alturas se puede estimar el valor del flujo.

Los *medidores tipo turbina* consisten en un rotor que se inserta en el flujo, el número de revoluciones que dé el rotor es directamente proporcional al flujo que pasa por él. El movimiento del rotor genera una diferencia de potencial y una frecuencia, los cuales son proporcionales al flujo, tal frecuencia se transmite a un convertidor indicador o totalizador. Este tipo de medidor de flujo está limitado por la viscosidad del fluido, además de que es delicado y el fluido a medir debe ser muy limpio, sin embargo, este medidor de flujo es de los más exactos ( $\pm 0.3\%$ ).

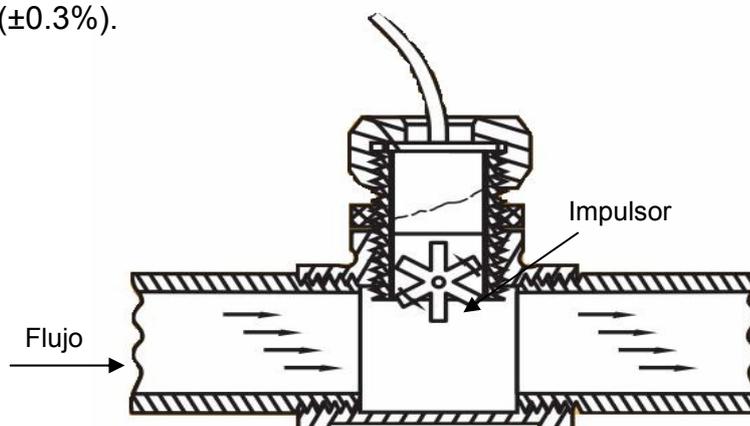


Figura 2.2. Medidor de flujo tipo turbina [12]

Los *medidores de flujo tipo acústicos de efecto Doppler* miden la velocidad de las partículas de fluido, ya sean partículas en suspensión o burbujas, que se desplazan en el fluido en movimiento.

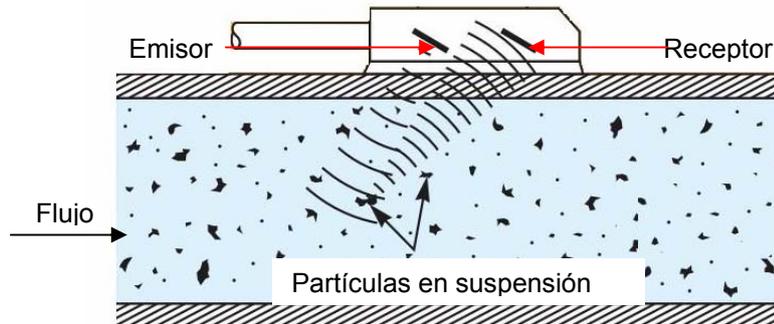


Figura 2.3. Medidor de flujo tipo ultrasónico [12]

Un transductor emite señales acústicas a una frecuencia conocida que son reflejadas por las partículas del fluido en movimiento y que son captadas por un transductor receptor.

Se analizan los cambios de frecuencia que se presentan entre la señal emitida y la recibida y el resultado promedio de estas variaciones se relaciona directamente con la velocidad media de las partículas que se están moviendo dentro del fluido, obteniéndose así la velocidad media del flujo.

La ventaja de estos medidores de flujo es que pueden medir flujo de fluidos con partículas en suspensión, además de que tienen una exactitud de 2%.

Los *medidores de flujo de tipo electromagnético*, basan su funcionamiento en la ley de Faraday, la cual dice que la fuerza electromotriz inducida a través de cualquier conductor, al moverse éste perpendicularmente a través de un campo magnético, es proporcional a la velocidad de dicho conductor. En el caso de la medición de flujo, el fluido es el conductor y la señal generada es captada por dos electrodos que se encuentran sobre la pared de la tubería colocados diametralmente opuestos. Por lo tanto, cuando el flujo se mueve a través del campo magnético, el potencial eléctrico inducido se detecta y se mide con los electrodos. La magnitud promedio de la velocidad del flujo en la tubería se mide

mediante la FEM generada. Este medidor de flujo requiere que el fluido sea conductor eléctrico, en general se tiene una exactitud de 1% [8]

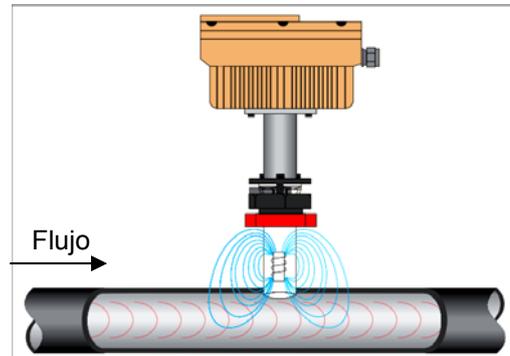


Figura 2.4. Medidor de flujo tipo electromagnético [12]

Los *Medidores de flujo láser* basan su funcionamiento en hacer incidir un haz de láser al flujo en el punto donde se quiera medir la velocidad. Los rayos son dispersados por las pequeñas partículas contenidas en el fluido, con lo que se induce una señal de efecto Doppler correspondiente a la frecuencia de la luz desviada, señal que es captada por unos sensores y que está relacionada directamente con la velocidad.

Los medidores de flujo de *presión diferencial* se basan en el principio de que al reducir el área perpendicular a la dirección del flujo existe un aumento de velocidad y una disminución de la presión, tal diferencia de presión es captada por dos tomas de presión colocadas antes y después de la reducción del área [6]. Estos medidores de flujo se basan en el principio de que al hacer pasar un fluido a través de una reducción de área, la pérdida de presión causada por tal constricción es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad del fluido. [8]

Dentro de los medidores de presión diferencial, los más utilizados son la placa de orificio, el tubo Venturi y la tobera de flujo.

La *placa de orificio* consta de una placa perforada insertada en una tubería perpendicularmente a la dirección del flujo, dos tomas de presión conectadas antes y después de la placa para captar la diferencia de presión que es

proporcional al cuadrado de la velocidad del flujo [8]. Este medidor de flujo tiene la ventaja de ser muy económico, de fácil fabricación y bajo costo de mantenimiento, además de poder medir el flujo tanto de líquidos como gases. Sin embargo, fluidos con partículas en suspensión afectan el comportamiento de este sensor de flujo, ya que dichas partículas se quedan atrapadas en las zonas de recirculación sobre la pared de entrada a la placa, tales partículas pueden obstruir las tomas de presión. Este medidor de flujo tiene una exactitud entre  $\pm 1\%$  a  $\pm 2\%$ .

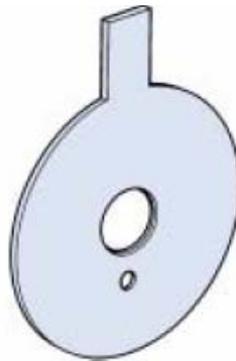


Figura 2.5. Sensor de placa de orificio [13]

El *tubo Venturi*, consta de un cono de entrada convergente que reduce el área perpendicular al flujo hasta el diámetro de la garganta, lugar en el cual se coloca la toma de baja presión, posteriormente se encuentra el cono divergente que aumenta el área hasta alcanzar el área de la tubería. Este medidor de flujo tiene una exactitud de 0.75%, sin embargo, el costo de este medidor de flujo es 20 veces mayor al de la placa de orificio [8].

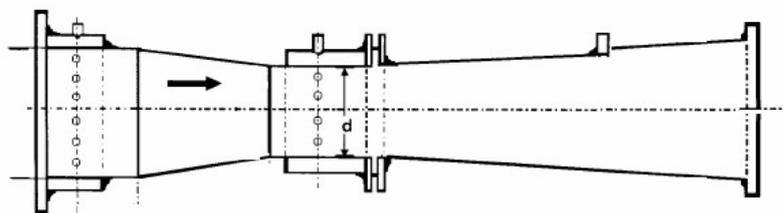


Figura 2.6. Medidor de flujo de tubo Venturi. [14]

La *tobera de flujo* tiene una sección de entrada que reduce el área suavemente que guía el flujo hacia la garganta [8]. A diferencia del *tubo venturi* no tiene cono divergente de salida. La toma de alta presión se localiza antes de la tobera y la toma de baja presión se localiza en la garganta. El costo de la

tobera de flujo es de 8 a 16 veces mayor que la placa de orificio y tiene una exactitud del orden de  $\pm 0.95\%$  a  $\pm 1.5\%$

En la literatura [9] se reporta que el 25% de los medidores de flujo instalados a nivel internacional son medidores de presión diferencial, en particular la industria del gas natural que emplea gran cantidad de placas de orificio para medir el gas que es transportado de un lugar a otro. También se reporta que la placa de orificio se utiliza en más de 80% de las aplicaciones en la medición y control de flujo de fluidos [10]

Por otro lado, se estima que actualmente al menos un 75% de los medidores industriales en uso son dispositivos de presión diferencial, siendo el más popular la placa de orificio [11].

Como se puede observar, la placa de orificio es un sensor de medición de flujo comúnmente utilizado para la estimación de flujo volumétrico en procesos industriales, sin embargo, debido a su principio de operación (la variable que se mide con la placa de orificio es diferencia de presión y posteriormente con este dato se calcula el flujo), y la naturaleza del flujo turbulento, dificulta la medición de esta diferencia de presión produciendo errores en la estimación del flujo, sin embargo, una de sus principales ventajas es su bajo costo, por lo cual, mediante el análisis de flujo a través de este sensor, se busca mejorar la exactitud en la medición del flujo con la placa de orificio.

## **2.5 REFERENCIAS.**

1. Streeter, V., Wylie, E., Bedford, K. Mecánica de Fluidos 9ª Edición, Mc. Graw Hill Interamericana S.A. Santa Fe de Bogotá Colombia, Enero 2001. pp. 4, 195 – 202,
2. Cengel, A., Cimbala, J. Mecánica de Fluidos - Fundamentos y Aplicaciones, Mc. Graw Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V. México D.F., Marzo 2006. pp. 324, 430, 472

3. Barrero, A., Pérez - Saborid., M., Fundamentos y Aplicaciones de la Mecánica de Fluidos, Mc Graw Hill Interamericana de España / S.A.U. Madrid España 2005. pp. 43, 57, 58
4. Hankjalic, K., Closure Models for Incompressible Turbulent Flows, Departamento de Física Aplicada, Universidad de Tecnología de Delft, Lorentzweg Holanda
5. Davidson, L., An Introduction to Turbulence Models, Publication 97/2 Chalmers University of Technology, Göteborg, Suecia, Noviembre 2003.
6. Fluent Inc. Manual de Usuario Fluent 6.1.22
7. Ferziger, J., Peric M., Computational Methods For Fluid Dynamics 3<sup>rd</sup> Edition. Springer – Verlag Berlin Heidelberg 2002. pp. 249 - 276
8. Cruz, A., Instrumentación Industrial 7<sup>a</sup> edición. Alfaomega - Marcombo., México, D.F., Noviembre 2005, pp. 119 - 180
9. Arias, R., Incertidumbre en la medición de flujo másico mediante una Placa de Orificio, Centro Nacional de Metrología, México, Abril 2001.
10. Villalobos, G., Medición de flujo - Placas de Orificio, Toberas de Flujo y Tubos de Venturi, Limusa – Noriega, México D.F. 1999, pp. 25 - 36
11. García, L., Teoría de la medición de caudales y volúmenes de agua e instrumental necesario disponible en el mercado, Medida y evaluación de las extracciones de agua subterránea. ITGE. Madrid, España. pp. 21 - 42
12. [http:// www.omega.com](http://www.omega.com)
13. Boletín Técnico de Spirax Sarco Ltd. Orifice Plate Flowmeters for Steam, Liquids and Gases. Spirax-Sarco Limited, Charlton House, Cheltenham, Gloucestershire, GL53 8ER UK.
14. Rivas, I., Tubos Venturi, Dall y Tobera, Serie Autodidáctica de Medición del Agua. Subdirección General de Administración del Agua. Coordinación de Tecnología Hidráulica.

### CAPITULO 3. SIMULACION NUMERICA

En el capítulo 2 se describieron los modelos de turbulencia más utilizados en Dinámica de Fluidos Computacional (DFC). La DFC es una rama de la Mecánica de Fluidos que hace uso de métodos numéricos para aproximar las soluciones de las ecuaciones diferenciales parciales que describen el comportamiento de los fluidos en movimiento y los fenómenos relacionados a estos, con lo cual se obtiene información sobre las características del flujo.

Cada modelo de turbulencia presenta ventajas y desventajas; para su selección se deben tener en cuenta algunos factores como lo son precisión requerida, tiempo de cómputo, capacidad de la computadora y sobretodo el tipo de fenómeno físico que se desea analizar / reproducir / modelar.

Los modelos de turbulencia más empleados en la simulación numérica de flujo de fluidos son  $k - \varepsilon$ ,  $k - \omega$ , RSM (Modelo de Esfuerzos de Reynolds) y LES (Large Eddy Simulation). En la actualidad, debido al desarrollo de las computadoras, el modelo DNS (Simulación Numérica Directa) ha tenido un gran impulso. Este modelo resuelve las ecuaciones de Navier Stokes de manera directa en cada uno de los elementos del dominio computacional sin la necesidad de promediar o aproximar más que las discretizaciones numéricas necesarias. Con lo cual se pueden estimar y controlar los errores, logrando así obtener información detallada acerca del flujo, sin embargo, para utilizar este modelo de manera precisa se requiere utilizar mallados espaciales muy finos y escalas de tiempo muy pequeñas, con lo cual se incrementan los requerimientos del equipo de cómputo [1].

En el caso particular de los flujos turbulentos, estos están formados por un amplio rango de escalas temporales y espaciales, por lo que sus propiedades cambian instantáneamente en el tiempo y espacio. Por su naturaleza, en el flujo turbulento se espera la presencia de remolinos de diversos tamaños. Los remolinos grandes son más energéticos en comparación con los pequeños, su tamaño y fuerza los hacen más efectivos para el transporte de momentum, lo cual no sucede con los remolinos pequeños, por lo cual, el modelo LES (Large Eddy Simulation) ha tenido una gran aceptación, ya que aproxima la solución

de las ecuaciones de Navier Stokes mediante la caracterización de los remolinos grandes, para lo cual se requiere un mallado espacial muy fino y por lo tanto escalas de tiempo muy pequeñas, con lo cual se incrementan los requerimientos de tiempo y capacidad del equipo de cómputo.

Los modelos RSM en comparación con los modelos  $k - \varepsilon$  y  $k - \omega$ , requieren de mayor memoria y tiempo de cómputo, sin embargo, proporcionan una mejor caracterización de flujos turbulentos debido al incremento de ecuaciones de transporte de esfuerzos de Reynolds [2,3]. En promedio, el modelo RSM requiere de 50 – 60 % mas tiempo por iteración en comparación con los modelos  $k - \varepsilon$ , además de que se requiere de 15 – 20% más memoria. [3]. Además, el modelo RSM requiere de más iteraciones para converger debido a la fuerte conexión entre los esfuerzos de Reynolds y el flujo medio [3].

En este trabajo se utilizaron los modelos RSM y LES con el fin de comparar la variación de resultados entre ellos.

Por su parte los modelos  $k - \varepsilon$  y  $k - \omega$ , pertenecen al grupo de modelos RANS (Reynolds Average Numerical Solution) los cuales para aproximar la solución de las ecuaciones diferenciales exactas, promedian en el tiempo las variaciones de momentum que presentan los flujos turbulentos. Dentro de los cuales el modelo  $k - \varepsilon$  aporta resultados confiables para la caracterización de flujos turbulentos y el tiempo de cómputo es menor en comparación con los otros modelos, se decidió utilizar este modelo como el principal modelo para llevar a cabo las simulaciones numéricas.

La mayoría de los flujos que se manejan en procesos industriales son turbulentos, sin embargo, en este trabajo también se realizaron simulaciones numéricas de flujos laminares, para los cuales se utilizó un modelo de caracterización de flujo laminar, tal modelo resuelve las ecuaciones de conservación de masa y de movimiento de manera simultánea.

En las subsecuentes secciones de éste capítulo se describen cada una de las etapas requeridas para llevar a cabo las simulaciones numéricas. Así mismo, se presentan los resultados obtenidos a partir de ellas.

El proceso de simulación numérica consta de las etapas que se muestran en la figura 3.1:

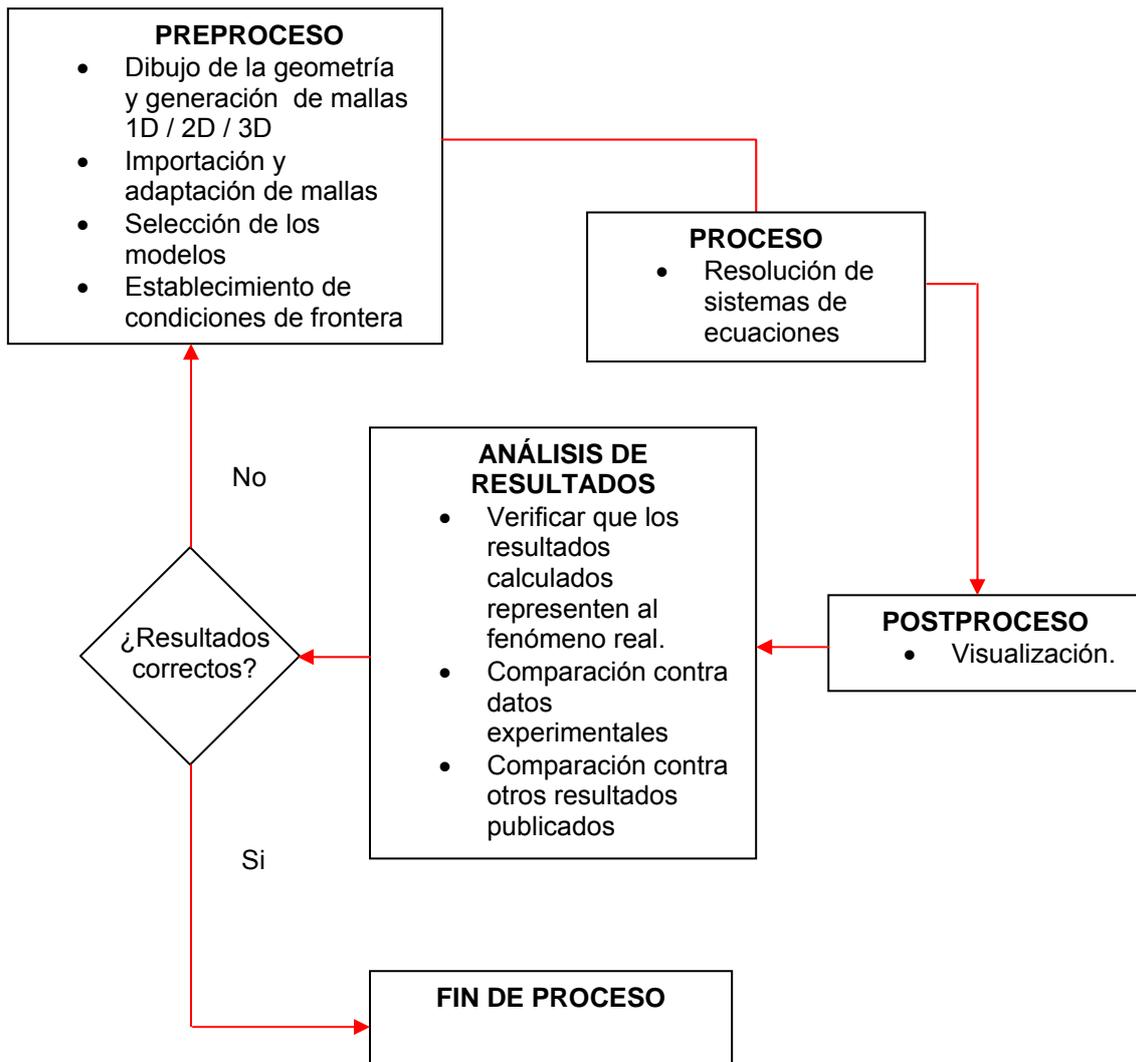


Figura 3.1. Diagrama del proceso de simulación numérica

### 3.1 DEFINICION DE LA GEOMETRIA

El primer paso para la simulación numérica es definir la geometría del sistema, la cual depende de las características del fenómeno por analizar.

En este trabajo se utiliza una tubería circular de 0.057 m de diámetro, cuya longitud es 4.5 m y la posición de la placa de orificio se encuentra a 3 m de la entrada de flujo a la tubería principal. Para el dibujo de la geometría se utilizó escala 1:1.

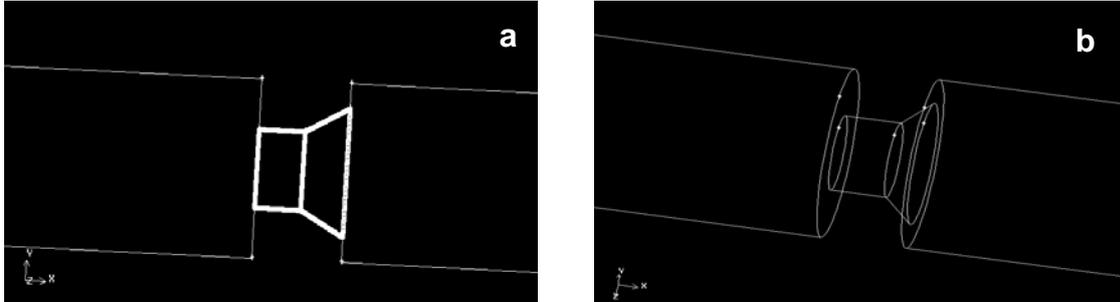


Figura 3.2. a) Dibujo de la geometría en 2D., b) Dibujo de la geometría en 3D

### 3.2 GENERACION DEL MALLADO DEL ESPACIO COMPUTACIONAL

El mallado es el proceso de discretización del espacio computacional donde actúa el flujo del fluido por analizar (el fluido dentro de la tubería). Este volumen por analizar se divide en pequeñas secciones o celdas, es decir, se genera una red en 1, 2 y/o 3 dimensiones según se requiera. Los puntos de intersección entre las celdas de la red se llaman nodos; en estos puntos es donde se realizan los cálculos numéricos para aproximar las soluciones de las ecuaciones diferenciales parciales en el caso de que se utilice el método de diferencias finitas. En el método de volumen finito, estos puntos se unen mediante líneas de la malla para formar caras, las cuales se agrupan para formar un conjunto de volúmenes de control y los cálculos numéricos se realizan al centro de cada uno de estos volúmenes [1]. Por tal razón, cuanto más fina sea la malla, las aproximaciones serán más exactas, ya que se hace el cálculo numérico en una mayor cantidad de puntos, además de que el espacio entre los nodos será menor y la información pasa de un nodo a otro de una manera más precisa.

Existen diferentes formas de volúmenes o celdas que se pueden formar para el mallado; unas de las más comunes en 3D son el hexaedro con 8 nodos y para aplicaciones en 2D se utiliza el cuadrilátero con 4 nodos. En algunos programas de DFC que utilizan el método de volumen finito se utiliza el tetraedro para 3D y celdas triangulares en 2D. [4]

Por su parte, existen diferentes tipos de mallas, las cuales pueden generar elementos de diferentes formas y arreglos, como pueden ser: *Mallas estructuradas*. En este tipo de malla los puntos están acomodados de manera regular. Están constituidas por familias de líneas con la propiedad de que los miembros de una familia no se cruzan entre sí y cruzan a un miembro de otra familia solo una vez. Por su parte, las *mallas no estructuradas* constan de celdas de diferentes formas, pero generalmente se emplean triángulos o cuadriláteros en 2D y tetraedros y hexaedros en 3D. [5] Generalmente este tipo de malla es conveniente para geometrías complejas, sin embargo, las mallas no estructuradas generan mayor número de celdas, lo cual incrementa el tiempo de cómputo. [1]

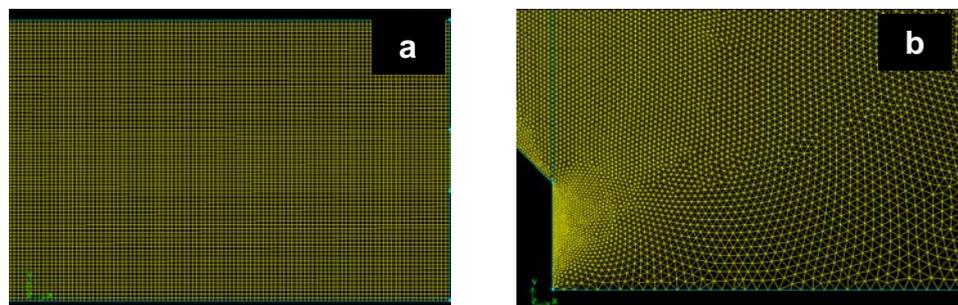


Figura 3.3 a) Malla estructurada en 2D; b) Malla no estructurada en 2D

El factor más importante para la obtener soluciones confiables mediante DFC es la calidad de la malla [5]. Para lo cual se deben identificar las zonas de mayor interés para el caso en estudio, con el fin de refinar la malla donde se requiera mayor precisión en la solución numérica, manteniendo la malla más burda en las zonas donde no se requiera conocer con demasiada precisión el comportamiento del flujo.

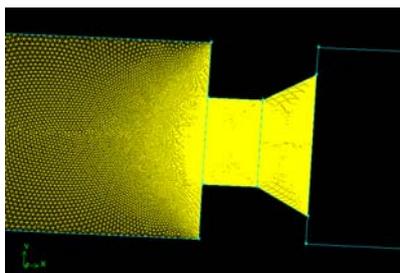


Figura 3.4 Generación de la malla en 2D en la placa y la sección anterior a ella. Obsérvese que el mallado es más fino en la placa y las regiones cercanas a ella, ya que se consideraron estas zonas como “zonas críticas”.

En base a lo anterior, para las simulaciones en 2D se utilizó una malla de 500,000 celdas triangulares; mientras que para 3D se utilizó una malla de 600,000 celdas cuando se simuló el flujo a través de una placa de 0.0015 m de espesor y 800,000 celdas tetragonales en la simulación del flujo a través de la placa de 0.023 m.

### **3.3 CONDICIONES DE INICIALES Y CONDICIONES DE FRONTERA.**

Las condiciones de frontera son muy importantes para los cálculos de DFC, ya que éstas le proporcionan al método numérico la información necesaria para iniciar el cálculo de las diferentes variables por analizar. La principal condición de frontera para modelar flujos en tuberías es aquella debida a la superficie de la misma; como el fluido no puede pasar a través de la superficie sólida, la componente normal de la velocidad relativa del fluido con respecto a la superficie debe ser cero a lo largo de toda la superficie, a esta condición de frontera se denomina de no deslizamiento [5]. Debido a esta condición, la componente tangencial de la velocidad sobre la superficie es cero.

Existen diferentes maneras para definir las condiciones de frontera a través de las cuales el fluido entra o sale del dominio computacional. En general se clasifican como condiciones donde se especifica la velocidad de entrada o salida, o condiciones que especifican la presión. Cuando se resuelven las ecuaciones de energía, turbulencia o ambas, se deben especificar la temperatura o las propiedades de turbulencia del fluido que entra al dominio

computacional [5]. En base a lo anterior se utilizaron las condiciones de frontera donde se especifica la velocidad a la entrada del dominio computacional y se consideró que no existe transferencia de calor a través de las paredes de la tubería dando lugar a que estos términos de energía no fueran considerados para el cálculo. Proporcionando al programa los datos mostrados en la tabla 3.1.

Para los modelos  $k - \varepsilon$  y RSM, se requiere especificar los valores de  $k$  (energía cinética turbulenta) y  $\varepsilon$  (rapidez de disipación de la energía cinética turbulenta). Los cuales de manera general se determinan con las ecuaciones (1) y (2) [1]:

$$k = u_{in}^2 \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{L} \quad (2)$$

Tabla 3.1 Velocidades de entrada de la tubería utilizados en 2D y 3D

Velocidad a la entrada (m/s)	D (m)	Re	$k \left( \frac{m^2}{s^2} \right)$	$\varepsilon \left( \frac{m^2}{s^3} \right)$
0.0227	0.057	1000	-	-
0.0341	0.057	1500	-	-
0.0455	0.057	2000	-	-
0.3421	0.057	15,000	$1.17 \times 10^{-3}$	$1.40 \times 10^{-3}$
0.4553	0.057	20,000	$2.02 \times 10^{-3}$	$3.19 \times 10^{-3}$
0.6842	0.057	30,000	$4.68 \times 10^{-3}$	$1.12 \times 10^{-2}$
0.9106	0.057	40,000	$8.20 \times 10^{-3}$	$1.17 \times 10^{-3}$
1.1383	0.057	50,000	$1.29 \times 10^{-2}$	$1.17 \times 10^{-3}$

Para este trabajo se utilizaron las correlaciones para  $k$  y  $\varepsilon$  propuestas en la literatura [6]:

$$k = 0.01 \times u_{in}^2 \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{2 \times k^{\frac{3}{2}}}{D} \quad (4)$$

Donde:

$k$  = Energía Cinética Turbulenta  $\frac{m^2}{s^2}$ ;  $\varepsilon$  = Tasa de disipación de la energía cinética turbulenta  $\frac{m^2}{s^3}$ ;  $D$  = Diámetro (m);  $u_{in}$  = Velocidad a la entrada (m/s)

Debido a que los experimentos y simulaciones se realizaron considerando el sistema aire – agua, las propiedades físicas de estos considerados en este trabajo son:

Tabla 3.2 Propiedades Físicas del Agua y Aire [3]

Fluido	$\mu \left( \frac{N \cdot s}{m^2} \right)$	$\rho \left( \frac{kg}{m^3} \right)$	$\nu \left( \frac{m^2}{s} \right)$
Agua	$1.03 \times 10^{-3}$	998	$1.03 \times 10^{-6}$
Aire	$1.79 \times 10^{-5}$	1.225	$1.46 \times 10^{-5}$

Además de la discretización espacial del dominio computacional, para flujos en estado no estacionario, se debe determinar el valor de  $\Delta t$  (incremento en el tiempo) el cual indica cada cuando se realizan los cálculos numéricos sobre toda la malla. Al igual que el refinamiento de la malla, no existe un método bien establecido para la determinación del intervalo de tiempo, generalmente la experiencia es la que en algunos casos ayuda a determinar este valor para lograr la estabilidad y convergencia de las soluciones.

Convergencia significa que conforme el tamaño del elemento de la malla y el tamaño de paso tiendan a cero, los resultados obtenidos se aproximarán a la solución del sistema de ecuaciones verdadera. Estabilidad significa que conforme el cálculo avance, los errores tienden a reducirse [8].

Por ejemplo, se tiene la ecuación de conducción de calor en su forma diferencial en una dimensión

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[ \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right] \quad (5)$$

Que mediante aproximaciones de la segunda derivada para el espacio y de la primera derivada en el tiempo se transforma en una ecuación algebraica quedando de la siguiente manera:

$$T_i^{l+1} = T_i^l + Fo(T_{i+1}^l - 2T_i^l + T_{i-1}^l) \quad (6)$$

En la cual  $Fo$  relaciona entre tamaño de paso y la distancia entre nodos, obteniendo así un tiempo adimensional (Número de Fourier).

$$Fo = \alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad (7)$$

donde:

$\alpha$ = difusividad térmica.  $T_i^l$ = Temperatura en cada nodo del dominio computacional.  $\Delta t$  = Tamaño de paso (intervalo de tiempo).  $\Delta x$  = Distancia entre nodos (intervalo espacial)

Para que no existan problemas de convergencia ni de estabilidad los valores de  $Fo$  que deben satisfacer son los que se muestran en la tabla 3.3

Tabla 3.3 Valores de  $Fo$  para los cálculos numéricos para las tres dimensiones.

No. De Dimensiones	$Fo$
1	$\geq 1/2$
2	$\geq 1/4$
3	$\geq 1/6$

Como se puede ver existe una estrecha relación entre el tamaño de paso y la distancia entre nodos, la cual se debe tener en consideración para obtener resultados confiables.

Se recomienda que se observe la cantidad de iteraciones que requiere el programa para converger. El número ideal de iteraciones por intervalo de tiempo es entre 10 y 20; si el programa requiere de más iteraciones, se recomienda reducir el espacio temporal. De suceder lo contrario, se puede hacer el intervalo de tiempo más grande [3]. Por lo tanto, después de hacer varias pruebas se determinó que el  $\Delta t$  adecuado para este trabajo es 0.001 s. En la figura 3.5 se muestran los valores de los residuales obtenidos en la simulación numérica en 3D con una velocidad de entrada de 1.138 m/s ( $Re = 50,000$ ), los cuales se encuentran por debajo del orden de  $1 \times 10^{-4}$ .

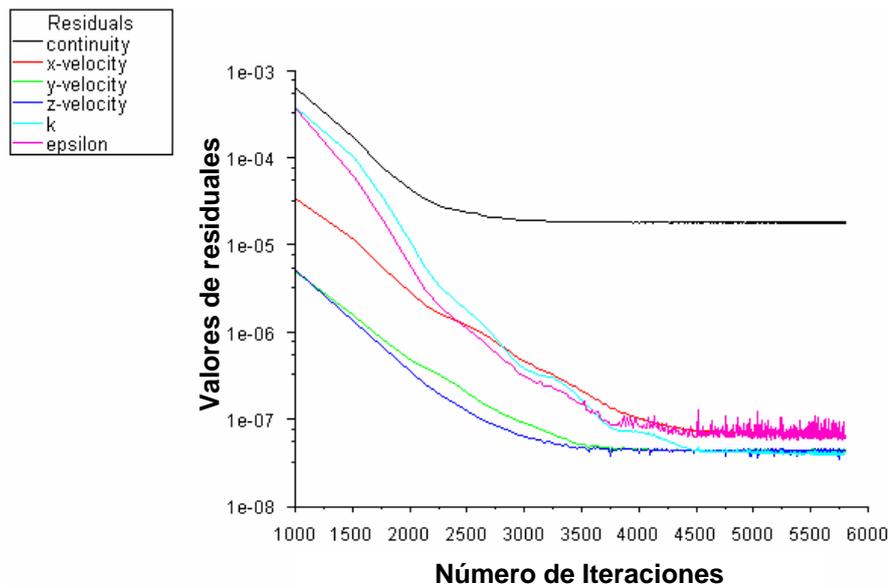


Figura 3.5 Residuales de la simulación numérica en 3D a 5 s de flujo. Velocidad de entrada de 1.138 m/s ( $Re = 50000$ ). Modelo  $k - \epsilon$

### 3.4 SIMULACIONES EN 2D

Se realizaron simulaciones con las velocidades indicadas en la tabla 3.1, utilizando una malla de 500,000 elementos triangulares,  $\Delta t$  de 0.001 s con la placa de orificio de 0.023 m de espesor con y sin ángulo a la descarga. El cálculo numérico de presión estática se realizó en los puntos representados en

la figura 3.6, los cuales tienen la misma posición que las tomas de presión del modelo experimental.

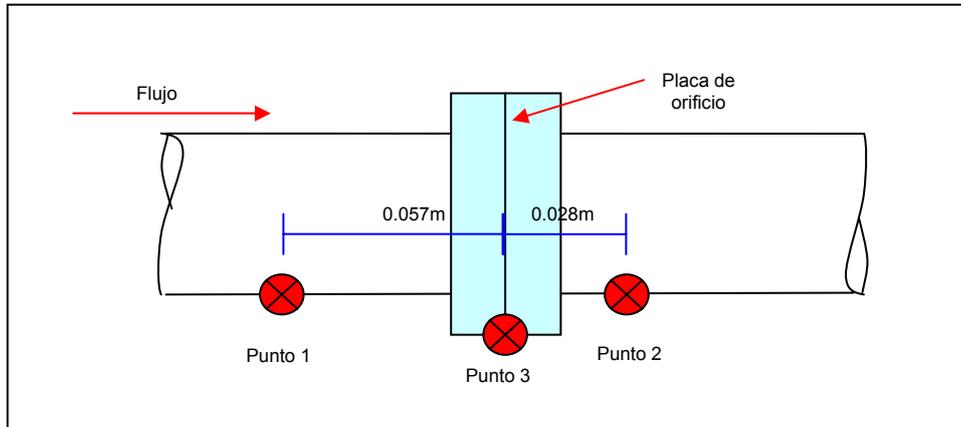


Figura 3.6 Localización de los puntos para el cálculo de la presión estática en la simulación numérica

Punto 1. Localizado a 0.057 m (1D) antes de la placa de orificio

Punto 2: Localizado a 0.028 m (0.5D) después de la placa de orificio

Punto 3: Localizado en la mitad del espesor de la placa de orificio únicamente cuando se utiliza la placa de orificio de 0.023 m de espesor.

Se calculó el flujo de dos maneras; mediante la ecuación (8) donde se hace uso de la diferencia de presión determinada numéricamente en los puntos indicados en la figura 3.6 y mediante la ecuación (10) que hace uso de la velocidad media obtenida de la integración del perfil de velocidad calculado numéricamente generado por la capa límite.

$$Q = A_0 \sqrt{\frac{2 \times \Delta P}{\rho}} \quad (8)$$

$$\bar{u} = \frac{\int_0^{2r} u(r) dr}{2r} \quad (9)$$

$$Q = \bar{u} A_1 \quad (10)$$

Donde:

$Q$  = Flujo ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $A_0$  = Área del orificio ( $\text{m}^2$ );  $A_1$  = Área de la tubería ( $\text{m}^2$ );

$r$  = Radio de la tubería (m);  $\bar{u}$  = Velocidad media (m/s);  $\Delta P$  = Diferencia de presión (Pa)

### 3.5 RESULTADOS DE SIMULACION NUMERICA EN 2D

En esta sección se muestran los resultados obtenidos mediante simulación numérica en 2D para las placas de orificio de 0.023 m de espesor y diámetro de 0.025 m.

Tabla 3.4 Resultados de simulación numérica en 2D con la placa de 0.023 m de espesor con ángulo de 45° a la descarga.

Presión Estática (Pa)			$\Delta P$ Estática (Pa)		Flujo ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) $Q = A_0 \sqrt{\frac{2 \times \Delta P}{\rho}}$		Velocidad Media (m/s)	Flujo ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) $Q = \bar{u} A_1$	Re
Punto 1	Punto 2	Punto 3	Puntos 1 - 2	Puntos 1 - 3	Puntos 1 - 2	Puntos 1 - 3			
-343.41	-4543.64	-5390.11	4200.23	5046.70	$1.41 \times 10^{-3}$	$1.56 \times 10^{-3}$	1.129	$2.88 \times 10^{-3}$	50000
-229.42	-2967.63	-3414.45	2738.21	3185.03	$1.15 \times 10^{-3}$	$1.24 \times 10^{-3}$	0.904	$2.30 \times 10^{-3}$	40000
-141.40	-1666.29	-1911.02	1524.89	1769.62	$8.58 \times 10^{-4}$	$9.24 \times 10^{-4}$	0.6803	$1.73 \times 10^{-3}$	30000
-77.75	-696.59	-816.50	618.84	738.76	$5.46 \times 10^{-4}$	$5.97 \times 10^{-4}$	0.4477	$1.14 \times 10^{-3}$	20000
-51.57	-413.60	-471.24	362.03	419.67	$4.18 \times 10^{-4}$	$4.50 \times 10^{-4}$	0.3405	$8.70 \times 10^{-4}$	15000
-2.47	-11.7841	-12.4198	9.31	9.95	$6.70 \times 10^{-5}$	$6.93 \times 10^{-5}$	0.04543	$1.16 \times 10^{-4}$	2000
-1.78	-7.67	-7.22	5.89	5.45	$5.33 \times 10^{-5}$	$5.13 \times 10^{-5}$	0.03403	$8.68 \times 10^{-5}$	1500
-1.12	-4.23	-3.36	3.11	2.24	$3.87 \times 10^{-5}$	$3.29 \times 10^{-5}$	0.0228	$5.82 \times 10^{-5}$	1000

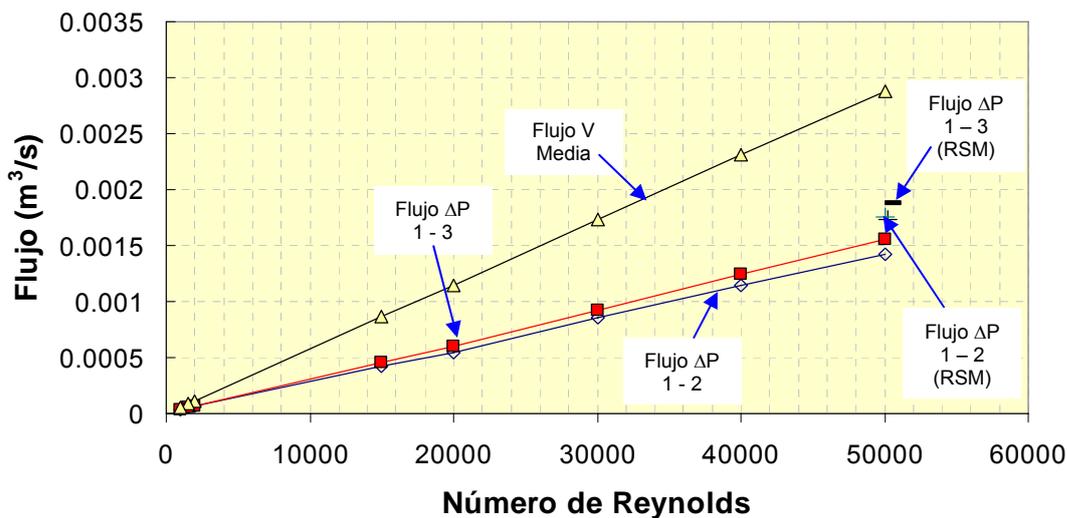


Figura 3.7 Comparación entre el flujo calculado con la integración del perfil de velocidad y el flujo calculado con la diferencia de presión para la placa de orificio de 0.023 m de espesor con ángulo a la descarga (Modelo  $k - \epsilon$  y RSM)

Tabla 3.5 Resultados de simulación numérica en 2D con la placa de 0.023 m de espesor sin ángulo a la descarga.

Presión Estática (Pa)			$\Delta P$ Estática (Pa)		Flujo ( $m^3/s$ ) $Q = A_0 \sqrt{\frac{2 \times \Delta P}{\rho}}$		Velocidad Media (m/s)	Flujo ( $m^3/s$ ) $Q = u A_1$	Re
Punto 1	Punto 2	Punto 3	Puntos 1 - 2	Puntos 1 - 3	Puntos 1 - 2	Puntos 1 - 3			
-327.691	-4613.91	-4567.04	4286.22	4239.35	$1.44 \times 10^{-3}$	$1.43 \times 10^{-3}$	1.1305	$2.88 \times 10^{-3}$	50000
-226.147	-2948.53	-2917.43	2722.38	2691.29	$1.15 \times 10^{-3}$	$1.14 \times 10^{-3}$	0.904	$2.30 \times 10^{-3}$	40000
-142.06	-1667.22	-1525.16	1507.18	1769.62	$8.58 \times 10^{-4}$	$8.53 \times 10^{-4}$	0.6803	$1.73 \times 10^{-3}$	30000
-78.09	-748.35	-739.80	670.26	661.70	$5.69 \times 10^{-4}$	$5.65 \times 10^{-4}$	0.4538	$1.16 \times 10^{-3}$	20000
-53.51	-427.94	-423.14	374.43	369.63	$4.25 \times 10^{-4}$	$4.22 \times 10^{-4}$	0.3405	$8.69 \times 10^{-4}$	15000

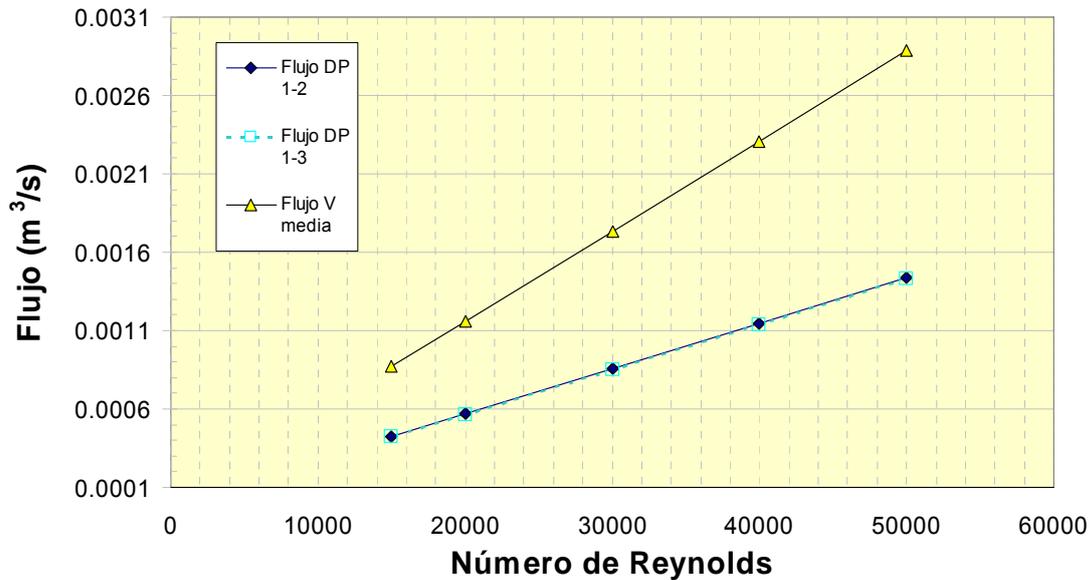


Figura 3.8 Comparación entre el flujo calculado con la integración del perfil de velocidad y el flujo calculado con la diferencia de presión para la placa de orificio de 0.023 m de espesor sin ángulo a la descarga. (Modelo k -  $\epsilon$ )

En las figuras 3.7 y 3.8 se puede observar que existen variaciones entre los flujos obtenidos con las diferencias de presión y el flujo obtenido de la integración del perfil de velocidad. Al aumentar la velocidad del flujo (incremento del número de Reynolds) esta diferencia se hace mayor. Esto se debe a que por la naturaleza de los flujos turbulentos, estos presentan variaciones de sus propiedades en las 3 dimensiones y la simulación en 2D no calcula tales variaciones de propiedades en una de estas dimensiones.

Posteriormente se podrá observar que en la simulación en 3D los flujos determinados con las diferencias de presión se aproximan más al flujo obtenido con la integración del perfil de velocidad tanto para flujos turbulentos como laminares.

En la figura 3.9 se muestra el comportamiento de la velocidad del flujo a lo largo de la tubería al variar el radio, desde el centro de la tubería donde se desarrolla la velocidad máxima del flujo, la mitad del radio y 0.9 veces el radio donde la velocidad es menor y tiende a cero cuanto más se acerca a la condición de no deslizamiento, es decir, en el punto cuando  $r \rightarrow R$ .

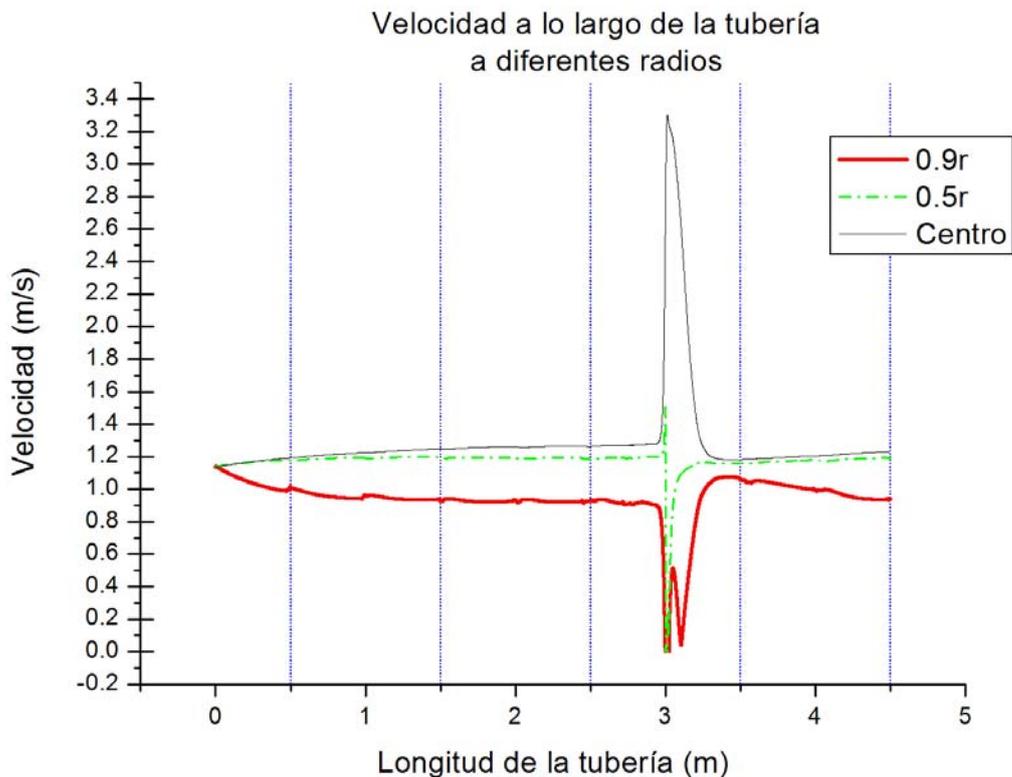


Figura 3.9 Velocidad a lo largo de la tubería a 5 s de flujo. Modelo  $k - \epsilon$  a diferentes radios.

En la figura 3.10 se hace una comparación entre las gráficas de velocidad máxima a lo largo de la tubería usando el modelo de turbulencia  $k - \epsilon$  y RSM a 5 s de flujo donde se puede observar que la principal diferencia existe después de la placa de orificio (3 m), donde existen grandes zonas de recirculación mostradas en las figuras 3.11 a y b.

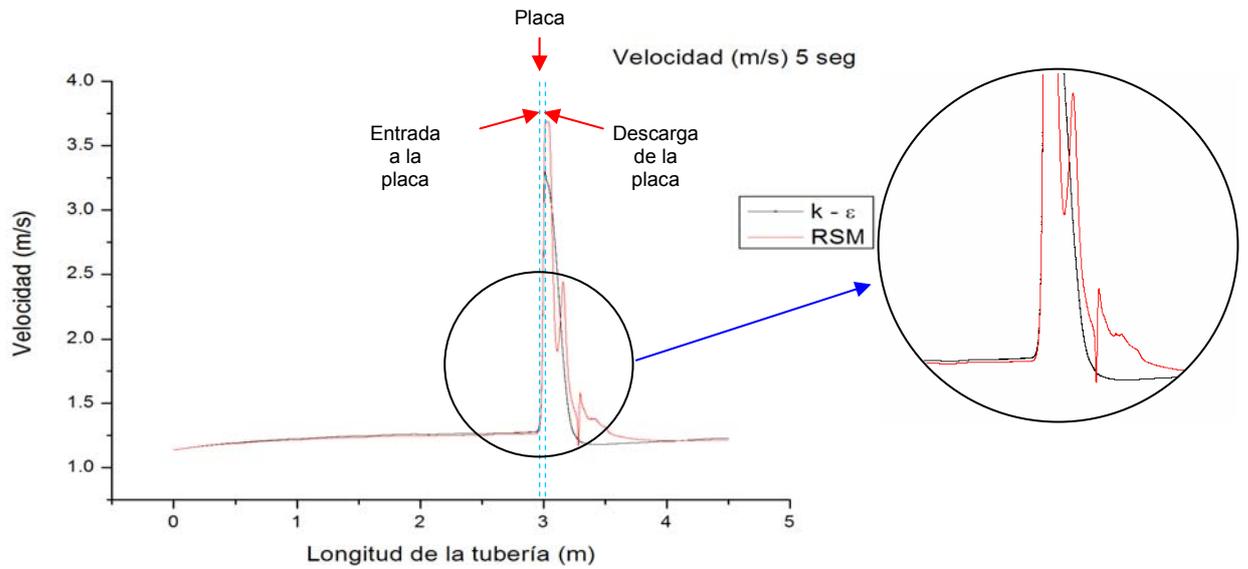


Figura 3.10 Velocidad máxima a lo largo de la tubería a 5 s de flujo. Modelos  $k - \epsilon$  y RSM

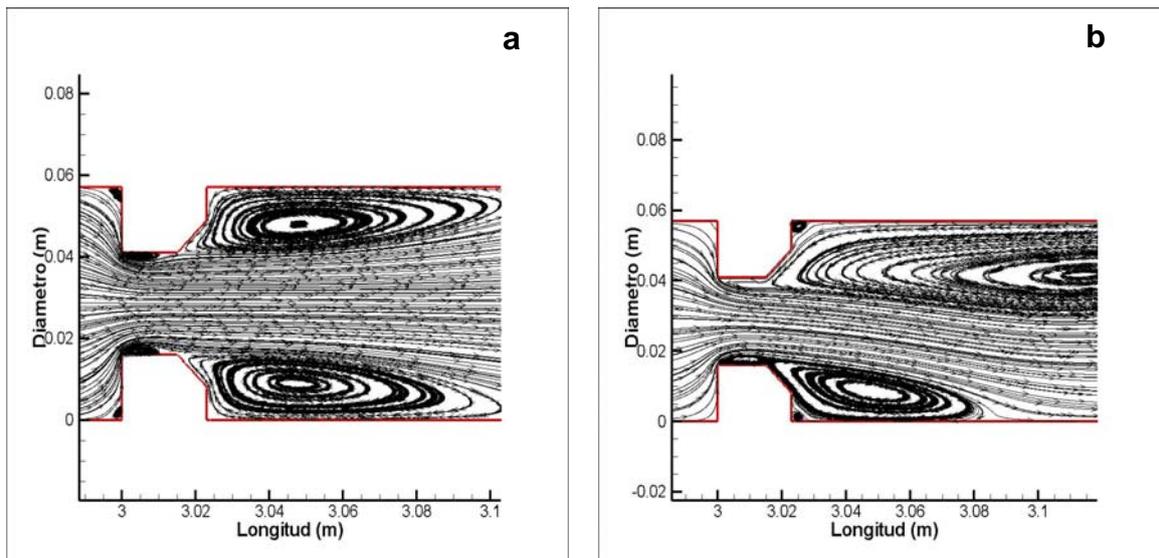


Figura 3.11 Líneas de Flujo a través de la Placa de orificio. a) Modelo  $k - \epsilon$ .  
(b) Modelo RSM

El modelo RSM caracteriza de manera más precisa la turbulencia, en este caso las zonas de recirculación producidas por la reducción del área transversal al flujo ya que este modelo resuelve 5 ecuaciones de transporte en 2D y 7 en 3D [1]. Sin embargo, este modelo requiere de mayor tiempo de cómputo, aunque los valores numéricos de presión estática en los puntos indicados en la figura

3.7 presentan variaciones entre el modelo  $k - \epsilon$  y RSM, aproximadamente de 2,200 (Pa), tal diferencia no es significativa en la medición de flujo.

El modelo RSM presenta un gran acoplamiento entre las ecuaciones de transferencia de momentum y los esfuerzos debidos a la turbulencia en el flujo, razón por la cual los cálculos pueden ser más propensos a presentar problemas de inestabilidad y dificultades de convergencia en comparación con el modelo  $k - \epsilon$  [3] como se puede ver en la figura 3.12 a y b.

Se puede observar que con el modelo  $k - \epsilon$  los residuales de continuidad alcanzan valores por debajo del orden de  $1 \times 10^{-4}$  en aproximadamente 1500 iteraciones, mientras que con el modelo RSM los residuales de continuidad no alcanzan tales valores incluso después de 8000 iteraciones.

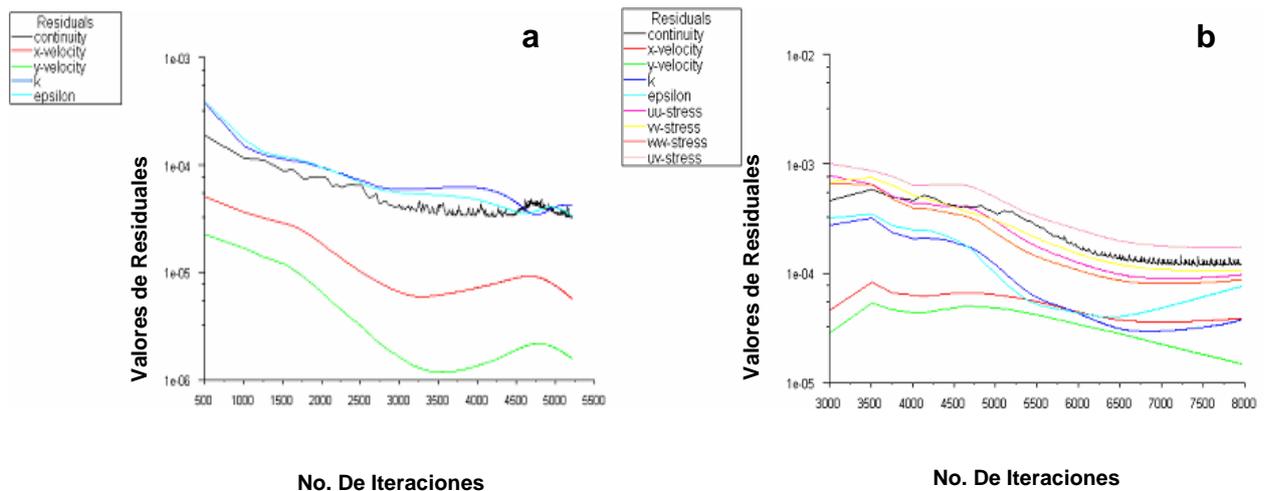


Figura 3.12 Residuales de la simulación numérica en 2D a 5 s de flujo. Velocidad de entrada de 1.138 m/s ( $Re = 50000$ ). a) Modelo  $k - \epsilon$ , b) Modelo RSM

### 3.6 SIMULACIONES EN 3D

Se realizaron simulaciones con las velocidades indicadas en la tabla 3.1 utilizando una malla de 600,000 elementos tetragonales para las simulaciones con la placa de 0.0015 m de espesor y de 800,000 elementos tetragonales para

la placa de 0.023 m de espesor. Como se puede observar en la figura 3.13, no ocurre ningún cambio en la velocidad máxima a lo largo de la tubería entre 5 s y 10 s, por lo que se consideró que la simulación hasta 5 s de flujo es suficiente, es decir, los resultados numéricos no variarán al aumentar el tiempo de flujo. Estas gráficas fueron generadas utilizando una velocidad a la entrada de 0.6842 m/s ( $Re = 30,000$ )

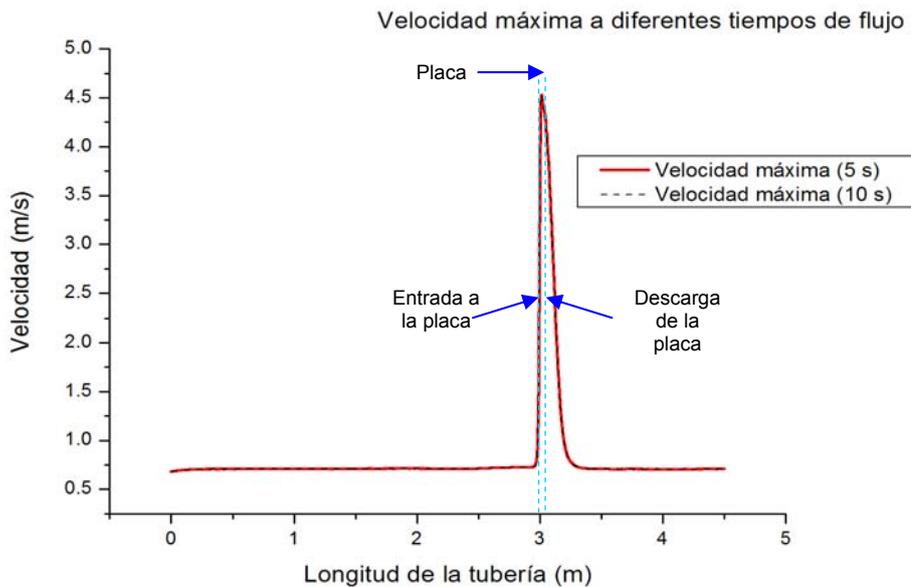


Figura 3.13 Velocidad máxima a 5 y 10 s de flujo a través de la placa de orificio de 0.023 m de espesor con ángulo de  $45^\circ$  a la descarga.

En la figura 3.14, se hace una comparación de la simulación de flujo a través de la placa de orificio de 0.0015 m de espesor con ángulo a la descarga entre el modelo de turbulencia  $k - \varepsilon$  y el modelo RSM utilizando una velocidad a la entrada de 1.138 m/s, donde se puede observar que no existen variaciones significativas en la velocidad máxima, sin embargo, el modelo RSM requiere de mayor tiempo y capacidad de cómputo. En las figuras 3.15 a y b, se puede observar que el modelo RSM presenta mayores dificultades de estabilidad y convergencia en comparación con el modelo  $k - \varepsilon$  como se mencionó en la sección 3.4.

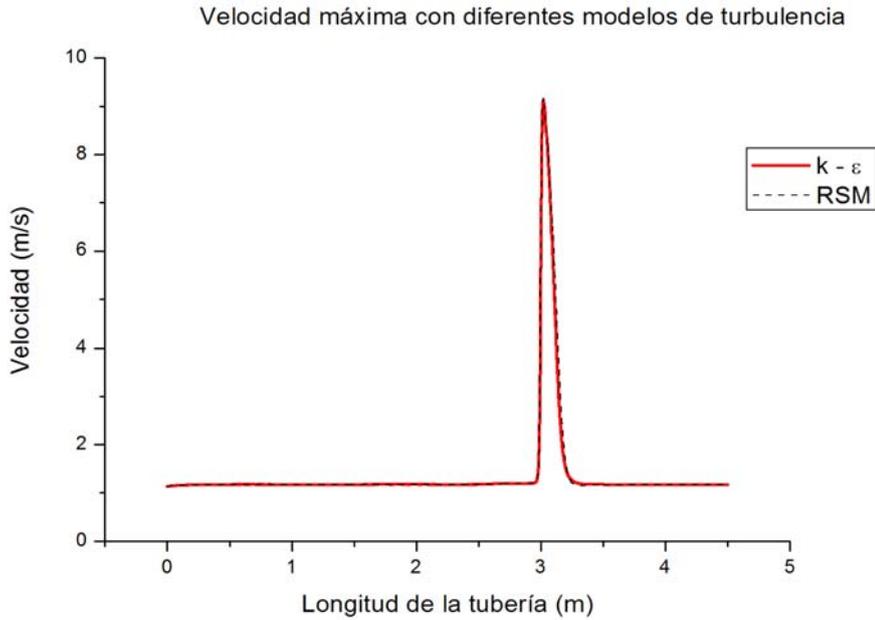


Figura 3.14 Velocidad a lo largo de la tubería a 5 s. Modelo  $k - \epsilon$  y RSM.  
Velocidad de entrada = 1.138 m/s

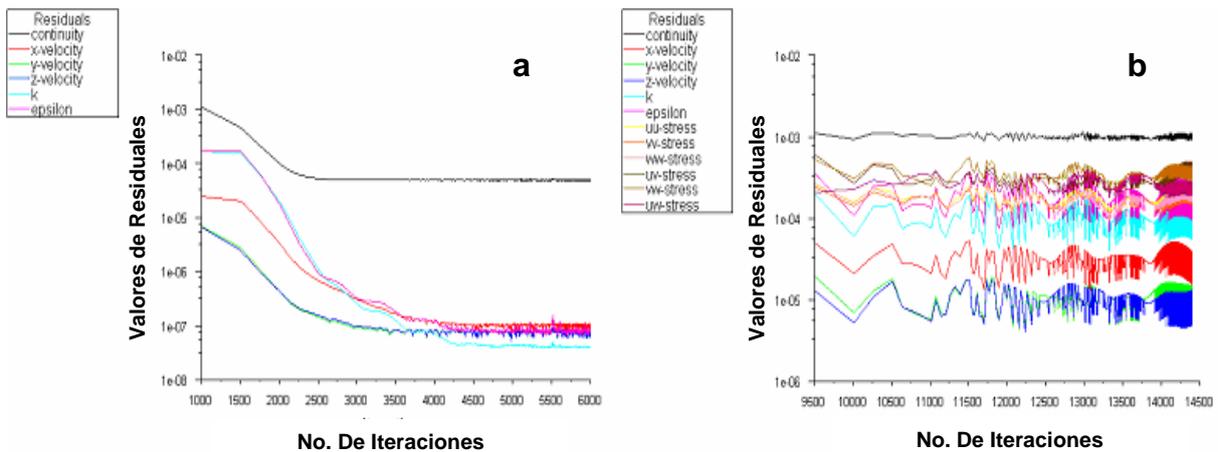


Figura 3.15 Residuales de la simulación numérica en 3D a 5 s de flujo.  
Velocidad de entrada de 1.138 m/s ( $Re = 50000$ ). a) Modelo  $k - \epsilon$ , b) Modelo RSM

En la figura 3.16, se hace una comparación entre la simulación de flujo de aire en la misma tubería, usando el modelo de turbulencia  $k - \epsilon$ , y LES (Large Eddy Simulation). Únicamente se simuló el flujo hasta 1.7 s, debido a que el modelo LES requiere de mucho tiempo y capacidad de cómputo. Para esta comparación se utilizó la placa de 0.0015 m de espesor.

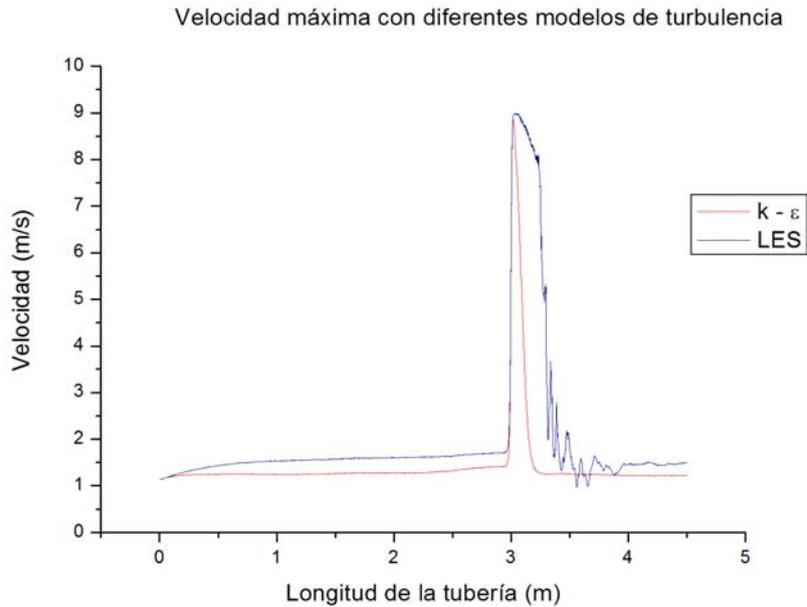


Figura 3.16 Velocidad a lo largo de la tubería a 1.7 s. Modelo  $k - \varepsilon$  y LES

La diferencia entre ambas curvas radica en que el modelo LES se aproxima más al fenómeno real, este modelo caracteriza mejor los remolinos grandes (turbulencia) como los que se forman después de la placa de orificio, es decir, calcula directamente las variaciones en las propiedades de estos remolinos grandes mientras que las propiedades de los pequeños son modeladas. Se puede observar que la gráfica de velocidad obtenida con el modelo  $k - \varepsilon$  es más uniforme, esto es debido a que este modelo promedia en el tiempo las variaciones de las propiedades del flujo turbulento.

### 3.7 RESULTADOS DE SIMULACION NUMÉRICA EN 3D

A continuación se muestran los resultados obtenidos mediante simulación numérica para las diferentes placas de orificio utilizadas.

Estos resultados serán comparados con valores experimentales y se discutirá además la exactitud y precisión de los cálculos numéricos con los resultados experimentales.

Tabla 3.6 Resultados de simulación numérica en 3D con la placa de 0.023 m de espesor con ángulo de 45° a la descarga.

Presión Estática (Pa)			ΔP Estática (Pa)		Flujo (m³/s) $Q = A_0 \sqrt{\frac{2 \times \Delta P}{\rho}}$		Velocidad Media (m/s)	Flujo (m³/s) $Q = u A_1$	Re
Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 1 - 2	Toma 1 - 3	Toma 1 - 2	Toma 1 - 3			
-717.26	-27983.44	-30303.69	27266.18	29586.43	$3.62 \times 10^{-3}$	$3.78 \times 10^{-3}$	1.098	$2.80 \times 10^{-3}$	50000
-488.52	-17972.49	-19472.54	17483.97	18984.02	$2.90 \times 10^{-3}$	$3.02 \times 10^{-3}$	0.8819	$2.25 \times 10^{-3}$	40000
-297.16	-10098.35	-10948.90	9801.18	10651.73	$2.17 \times 10^{-3}$	$2.26 \times 10^{-3}$	0.6628	$1.70 \times 10^{-3}$	30000
-144.97	-4358.55	-4733.38	4213.58	4588.41	$1.42 \times 10^{-3}$	$1.49 \times 10^{-3}$	0.4375	$1.11 \times 10^{-3}$	20000
-91.11	-2513.32	-2734.08	2422.21	2642.98	$1.08 \times 10^{-3}$	$1.13 \times 10^{-3}$	0.3368	$8.59 \times 10^{-4}$	15000
-6.72	-50.71	-54.24	43.99	47.52	$1.46 \times 10^{-4}$	$1.51 \times 10^{-4}$	0.04736	$1.20 \times 10^{-4}$	2000
-4.81	-31.22	-31.22	26.41	26.41	$1.12 \times 10^{-4}$	$1.13 \times 10^{-4}$	0.03561	$9.08 \times 10^{-5}$	1500
-2.99	-13.85	-14.62	10.86	11.63	$7.24 \times 10^{-5}$	$7.49 \times 10^{-5}$	0.02368	$6.04 \times 10^{-5}$	1000

Tabla 3.7 Resultados de simulación numérica en 3D con la placa de 0.023 m de espesor sin ángulo a la descarga

Presión Estática (Pa)			ΔP Estática (Pa)		Flujo (m³/s) $Q = A_0 \sqrt{\frac{2 \times \Delta P}{\rho}}$		Velocidad media (m/s)	Flujo (m³/s) $Q = u A_1$	Re
Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 1 - 2	Toma 1 - 3	Toma 1 - 2	Toma 1 - 3			
-719.00	-29193.7	-31437.78	28474.71	30718.78	$3.71 \times 10^{-3}$	$3.85 \times 10^{-3}$	1.098	$2.80 \times 10^{-3}$	50000
-489.14	-18782	-20176.53	18292.90	19687.39	$2.97 \times 10^{-3}$	$3.08 \times 10^{-3}$	0.8819	$2.25 \times 10^{-3}$	40000
-297.13	-10580.3	-11326.2	10283.12	11029.06	$2.23 \times 10^{-3}$	$2.30 \times 10^{-3}$	0.6628	$1.70 \times 10^{-3}$	30000
-148.02	-4713.05	-5017.27	4565.03	4869.25	$1.48 \times 10^{-3}$	$1.53 \times 10^{-3}$	0.4375	$1.11 \times 10^{-3}$	20000
-90.78	-2656.17	-2815.21	2565.39	2724.43	$1.11 \times 10^{-3}$	$1.14 \times 10^{-3}$	0.3368	$8.59 \times 10^{-4}$	15000

Tabla 3.8 Resultados de simulación numérica en 3D con la placa de 0.0015 m de espesor con ángulo de 45° a la descarga.

Presión Estática (Pa)			DP Estática (Pa)		Flujo (m³/s) $Q = A_0 \sqrt{\frac{2 \times \Delta P}{\rho}}$		Velocidad Media (m/s)	Flujo (m³/s) $Q = u A_1$	Re
Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 1 - 2	Toma 1 - 3	Toma 1 - 2	Toma 1 - 3			
-729.64	-43266.50		42536.86	-	$4.53 \times 10^{-3}$	-	1.098	$2.80 \times 10^{-3}$	50000
-493.69	-27664.27		27170.58	-	$3.62 \times 10^{-3}$	-	0.8819	$2.25 \times 10^{-3}$	40000
-301.03	-15635.43		15334.40	-	$2.72 \times 10^{-3}$	-	0.6628	$1.69 \times 10^{-3}$	30000
-146.36	-6758.54		6612.18	-	$1.78 \times 10^{-3}$	-	0.4375	$1.11 \times 10^{-3}$	20000
-91.71	-3902.45		3810.74	-	$1.35 \times 10^{-3}$	-	0.3368	$8.59 \times 10^{-4}$	15000
-6.53	-71.15		64.62	-	$1.76 \times 10^{-4}$	-	0.04736	$1.20 \times 10^{-4}$	2000
-4.69	-40.75		36.06	-	$1.32 \times 10^{-4}$	-	0.03578	$9.13 \times 10^{-5}$	1500
-2.94	-18.78		15.84	-	$8.74 \times 10^{-5}$	-	0.02385	$6.08 \times 10^{-5}$	1000

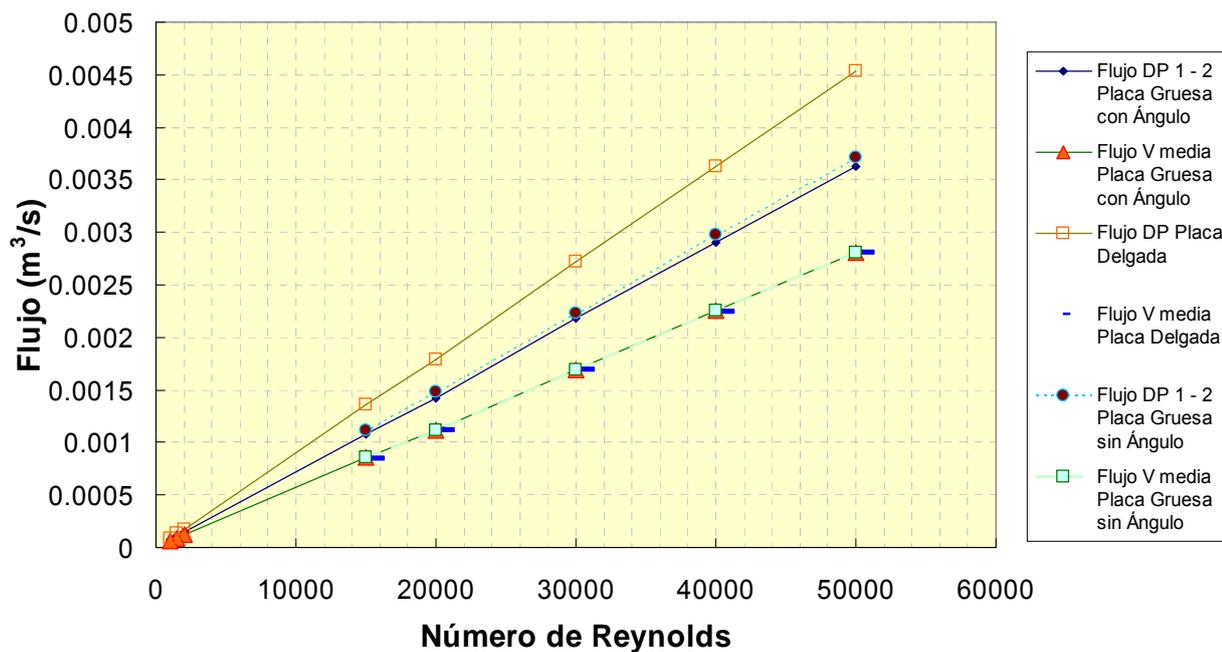


Figura 3.17 Comparación entre el flujo calculado con la integración del perfil de velocidad y el flujo calculado con la diferencia de presión para diferentes placas de orificio.

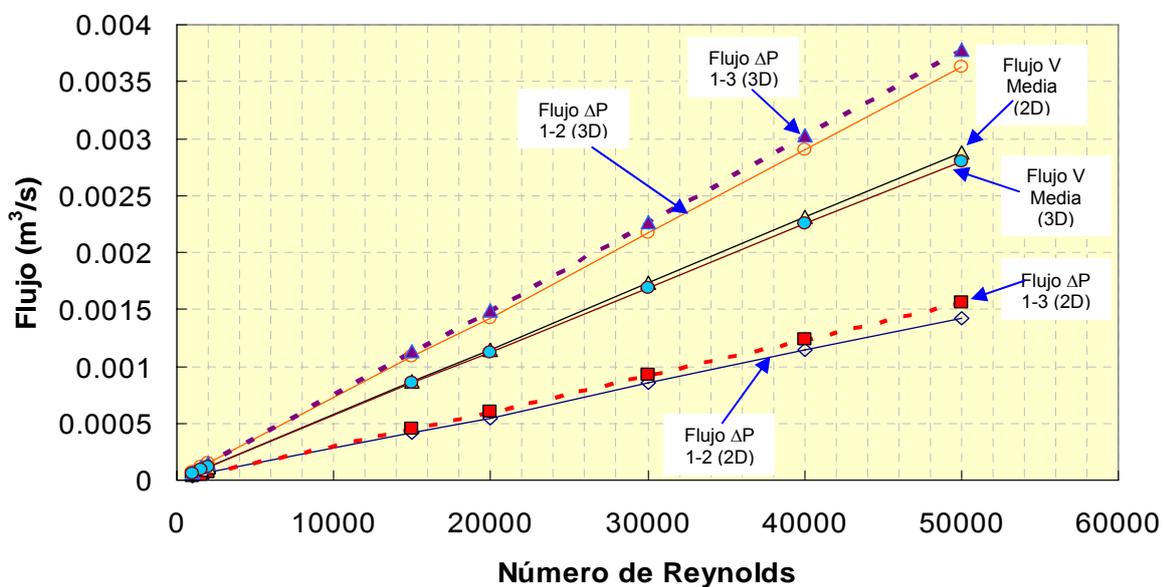


Figura 3.18 Comparación entre simulaciones en 2D y 3D con la placa de orificio de 0.023 m de espesor con ángulo de 45° a la descarga

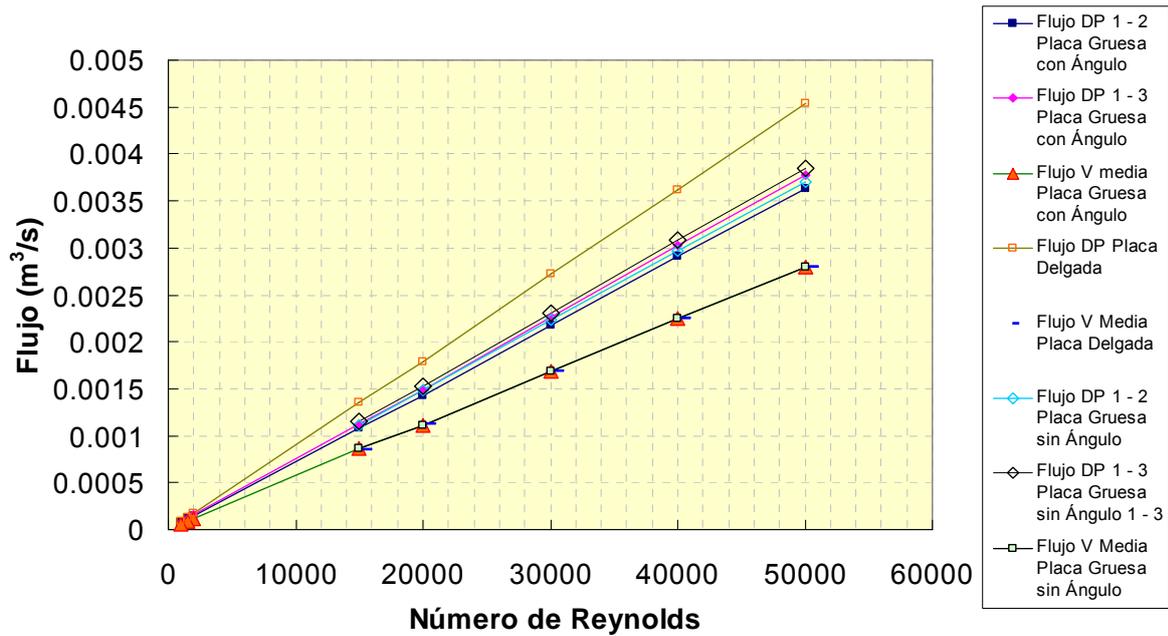


Figura 3.19 Comparación entre el flujo calculado con la integración del perfil de velocidad y el calculado con la diferencia de presión con diferentes placas de orificio en 3D

### 3.8 RESUMEN

Las simulaciones en 3D presentan una mayor aproximación al valor estimado con la velocidad media obtenida mediante la integración del perfil de velocidad a 2.95 m donde el perfil se encuentra totalmente desarrollado, en comparación con las simulaciones en 2D, tanto para flujos laminares como flujos turbulentos (figura 3.19).

Dentro de las simulaciones en 3D, el flujo calculado con la diferencia de presión en los puntos 1 - 2 y 1 - 3 con las placas de 0.023 m de espesor se aproximan más al flujo calculado con la integración del perfil de velocidad en comparación con la placa de 0.0015 m de espesor.

Por su parte, el modelo de turbulencia  $k - \epsilon$  presenta una aproximación aceptable a los valores del flujo calculado con la integración del perfil de

velocidad. El tiempo de cómputo es menor en comparación con los demás modelos de turbulencia utilizados (RSM y LES), sin embargo la precisión de éste no es comparable a la obtenida con estos últimos.

El tamaño de paso ( $\Delta t$ ) utilizado de 0.001 s presenta una buena convergencia como se puede ver en las figuras 3.15 a y b donde se muestra como los valores de los residuales se encuentran por debajo de los valores máximos recomendados de  $10^{-3}$  [3].

### 3.9 REFERENCIAS.

1. Ferziger, J., Peric M. Computational Methods For Fluid Dynamics 3<sup>rd</sup> Edition. Springer – Verlag Berlin Heidelberg 2002. pp. 26, 35 – 37, 249 – 251, 268
2. Hilgenstock A., Ernst R. Analysis of Installation Effects by Means of Computacional Fluid Dynamics. CFD vs Experiments?, Journal of Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 7 No. 3/4, Octubre 1996, pp. 161 – 171
3. Fluent Inc. Manual de Usuario de Fluent 6.1.22
4. Comunicación Privada C. Vilchis UAM Azcapotzalco. Teoría sobre modelos de Turbulencia. Marzo 2006
5. Cengel, A., Cimbala, J., Mecánica de Fluidos - Fundamentos y Aplicaciones, Mc. Graw Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V. México D.F., Marzo 2006. pp. 818 – 829
6. Solorio-Díaz, G., Morales, R.D., Palafox-Ramos, J., García-Demedices, L., Ramos-Banderas, A., Analysis of Fluid Flow Turbulence in Tundishes Fed By a Swirling Ladle Shroud., Isij International, Vol. 44, Febrero 2004, pp. 1024 - 1032
7. Launder, B.E. and Spalding, D.B., The Numerical Computation of Turbulent Flows., Journal of Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 3, 1974. pp 269 - 289
8. Chapra, S., Canale R. Métodos Numéricos para Ingenieros 4<sup>a</sup> Edición. Mc Graw Hill, México, D.F. 2003, pp. 880 – 883

## **CAPITULO 4. DISEÑO DE EXPERIMENTOS**

En este capítulo se describe el procedimiento que se siguió para la determinación de las dimensiones de la tubería principal, así como para la localización del sensor de medición de flujo dentro de la instalación experimental. Para ello se realizó un análisis de la capa límite con el fin de determinar la longitud de tubería recta necesaria antes del sensor de placa de orificio y así obtener un flujo completamente desarrollado y caracterizado.

### **4.1. LONGITUD DE ENTRADA DE FLUJOS TOTALMENTE DESARROLLADOS.**

Para la medición adecuada del flujo de fluidos en tuberías de cualquier geometría, es importante considerar que el flujo se encuentre totalmente desarrollado, es decir, que la variación de presión y velocidad del fluido no cambien con respecto a la longitud en la dirección del flujo. Además de que se requiere eliminar del flujo las perturbaciones generadas por accesorios instalados en la tubería, como válvulas, termo pozos, inyectores, difusores, cambios de dirección, entre otros [1]. También cuando se requieren mediciones más precisas, se recomienda instalar rectificadores de flujo antes del instrumento de medición; estos también necesitan contar con secciones rectas de tubería con longitud definida antes y después del mismo [1].

Para conocer la longitud adecuada de tubería recta para obtener un flujo totalmente desarrollado existen diferentes criterios, como lo son el gradiente de presión, la distribución de velocidad media y las cantidades de turbulencia [2]. El gradiente de presión requiere generalmente longitudes de tubería de tres a cuatro veces el diámetro de la tubería para desarrollarse; por su parte, el criterio de velocidad media requiere una longitud entre 30 y 60 veces el diámetro; mientras que las cantidades de turbulencia requieren longitudes aún mayores. Sin embargo, el criterio que más frecuentemente se plantea en la literatura es que los perfiles de velocidad media no cambian en la dirección del flujo [2-11].

Usualmente en aplicaciones industriales, la longitud de la tubería para lograr el desarrollo del flujo es varias veces la longitud de entrada y se considera que el flujo está totalmente desarrollado en toda la tubería. Esta consideración presenta resultados relativamente razonables para tuberías largas y para tuberías cortas se presentan resultados menos adecuados, ya que se subestiman los esfuerzos de corte de la pared [3]. De esto último, se han desarrollado modelos que aproximan la longitud de entrada hidrodinámica para flujos laminares y flujos turbulentos [3-10]. La Tabla 4.1 presenta tales modelos.

Tabla 4.1. Representación de la relación entre la longitud de entrada y el diámetro de tubería para obtener un flujo totalmente desarrollado.

Regimen Laminar	Regimen Turbulento	Ref.
$\frac{L}{D} = 0.05 \cdot Re$	$\frac{L}{D} = 1.359 \cdot Re^{0.25}$	3
$\frac{L}{D} = 0.06 \cdot Re$	$\frac{L}{D} = 4.4 \cdot \sqrt[6]{Re}$	4
$\frac{L}{D} = 0.065 \cdot Re$	$\frac{L}{D} = 40$	5
$\frac{L}{D} = 0.6 + 0.04 \cdot Re$		6
$\frac{L}{D} = 0.01 \cdot Re$		7
$\frac{L}{D} = 0.026 \cdot Re$		
$\frac{L}{D} = 0.052 \cdot Re$		8
$\frac{L}{D} = \frac{Re}{20}$	$\frac{L}{D} = 0.623 \cdot Re^{0.25}$	9
	$\frac{L}{D} = 10$	10

Como se puede ver, existen diferentes ecuaciones para determinar la longitud de tubería necesaria para tener un flujo totalmente desarrollado, las cuales fueron obtenidas mediante experimentos, correlaciones y consideraciones

empíricas que no siempre toman en cuenta algunos factores que presenta el flujo.

En la Figura 4.1 se muestran las diferentes relaciones  $L/D$  reportadas [3-10]. Como se aprecia en la figura, en el caso de la región laminar existe una buena correlación entre las diferentes correlaciones reportadas; solamente las 2 relaciones reportadas por Bejan [7] salen de la tendencia reportada por los otros autores. En el caso de la región turbulenta, las correlaciones presentadas por Cengel & Cimbala [3] y Munson et. al. [4] se aproximan bastante entre sí y presentan valores mayores a los determinados por Latzko [9]. Por su parte, Potter et. al. [5] establecen que la mayoría de los flujos utilizados en la industria son turbulentos, por lo que para facilitar la determinación de la longitud de tubería que garantizará un flujo totalmente desarrollado, la relación  $L/D$  es constante y tiene un valor de 40. Por su parte, Smits [10] asegura que tal relación constante tiene un valor de 10. En cualquiera de estos dos últimos casos, no se toma en cuenta el efecto que el número de Reynolds sobre las dimensiones requeridas para tener un flujo totalmente desarrollado.

Así mismo, se puede apreciar una fuerte dependencia de las dimensiones de la tubería con el número de Reynolds. En la región laminar se puede ver una dependencia mayor que en el región turbulenta; esto se debe a que en el régimen laminar, la velocidad media del fluido depende de la magnitud de los esfuerzos cortantes entre el mismo y la tubería que lo transporta. Por su parte, en el régimen turbulento, la magnitud de los esfuerzos viscosos se minimiza debido a las trayectorias de flujo erráticas que sigue el fluido durante su movimiento. Tales trayectorias, no permiten predecir de manera precisa los esfuerzos cortantes entre el fluido y la pared del tubo que contiene al fluido; sin embargo, es posible determinar la magnitud promedio de tales esfuerzos. Es decir se considera un efecto viscoso efectivo, el cual es menor en magnitud al esfuerzo viscoso determinado en la región laminar. Consecuentemente, las relaciones  $L/D$  en la región turbulenta serán menores a las determinadas para la región laminar del flujo en cuestión.

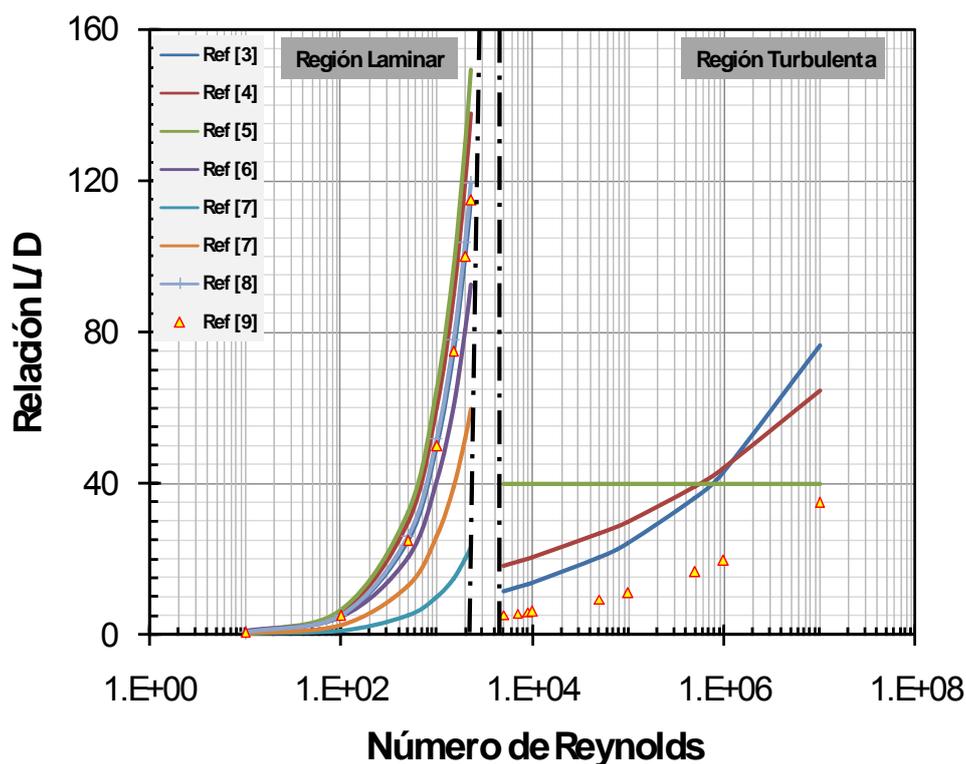


Figura 4.1 Determinación de la longitud de entrada hidrodinámica en función del número de Reynolds.

#### 4.2. DETERMINACION DE LA LONGITUD DE ENTRADA MEDIANTE EL ANALISIS DE CAPA LÍMITE

Tomando en cuenta los diferentes modelos propuestos en la Tabla 4.1, se presenta a continuación un análisis de capa límite para determinar la longitud de tubería (longitud de entrada necesaria) para asegurar un flujo totalmente desarrollado.

La capa límite es una región en el flujo que se genera debido a los efectos de los esfuerzos cortantes provocados por la viscosidad del fluido, la cual divide al flujo en dos regiones: la capa límite y el flujo central. En la capa límite los efectos viscosos y los cambios de velocidad son considerables, mientras que en la región de flujo central los efectos viscosos son despreciables [3]. El espesor de la capa límite se define cuando se alcanza el 99% de la velocidad máxima de flujo. La capa límite crece en dirección del flujo hasta alcanzar el

centro de la tubería; es entonces cuando se considera que el flujo se encuentra totalmente desarrollado. Esta se puede estimar mediante las ecuaciones (1) y (2) [3,10]:

$$\delta = \frac{5.48 \times L}{\sqrt{\text{Re}}} \quad (1) \quad (\text{Flujo Laminar})$$

$$\delta = \frac{0.377 \times L}{\sqrt[5]{\text{Re}}} \quad (2) \quad (\text{Flujo Turbulento})$$

Donde;  $\delta$  = Espesor de capa límite (m),  $L$  = Longitud de entrada hidrodinámica (m),  $\text{Re}$  = Número de Reynolds

El desarrollo del flujo se puede dividir en región de entrada y totalmente desarrollada. En la región de entrada el flujo se encuentra en desarrollo hidrodinámico y su longitud se considera como la distancia desde la entrada de la tubería hasta donde el esfuerzo cortante debido a la pared alcanza dentro de aproximadamente 99% el valor correspondiente al flujo totalmente desarrollado, en esta región se está formando el perfil de velocidad. Después de esta región se encuentra la región totalmente desarrollada, donde el perfil de velocidad es constante. (Ver figura 4.2)

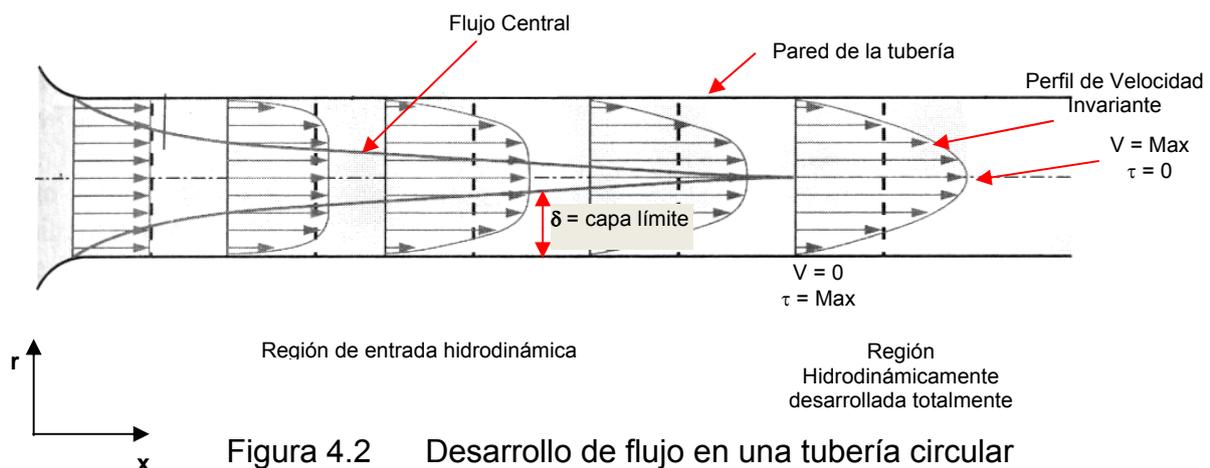


Figura 4.2 Desarrollo de flujo en una tubería circular

En las figuras 4.3 y 4.4 se muestran los espesores de capa límite en función de la longitud para flujo laminar y flujo turbulento respectivamente, mediante el

empleo de las ecuaciones (1) y (2) antes descritas para una tubería circular de 0.057 m de diámetro.

Para el caso del flujo laminar, se puede observar que después de 2 m no hay cambios significativos en la pendiente de las curvas, es decir, el espesor de capa límite tiende a permanecer constante, donde se puede asegurar que el flujo se encuentra totalmente desarrollado, ya que prácticamente no existen variaciones en el perfil de velocidad. Por su parte, en el régimen turbulento se aprecia claramente la necesidad de una longitud hidrodinámica más corta.

Basándonos en el análisis de capa límite, pudimos determinar experimentalmente una nueva serie de relaciones  $L/D$ ; la comparación de nuestros datos con los presentados en la literatura, resulta en que en realidad la relación  $L/D$ , no sigue del todo lo estipulado por los modelos presentados [3-10].

Tal variación se puede apreciar en la Figura 4.5. En esta figura, se aprecian las relaciones  $L/D$  obtenidas experimentalmente contra los valores previamente calculados tanto para el flujo laminar, como para el flujo turbulento. Dependiendo el valor del número de Reynolds, se puede apreciar que la longitud de entrada puede ser mayor o menor a lo calculado; esto se debe a que a pesar de que el  $Re$  se define por la velocidad del fluido y la geometría del ducto para un fluido dado, la relación que delimita la longitud de entrada es aquella entre el diámetro hidráulico y la velocidad del flujo. Así, al disminuir el diámetro, la velocidad crecerá de manera tal que se conserve el  $Re$ . Si esta relación entre diámetro y velocidad no se conserva, entonces el  $Re$  cambia automáticamente, de forma tal que la relación  $L/D$  también lo hace. En otras palabras, para un  $Re$  dado, existen diferentes relaciones  $L/D$ , tales que satisfacen la obtención de un perfil de velocidad totalmente desarrollado. Por lo anterior, se puede elegir libremente una relación  $L/D$  menor a lo sugerido en la literatura.

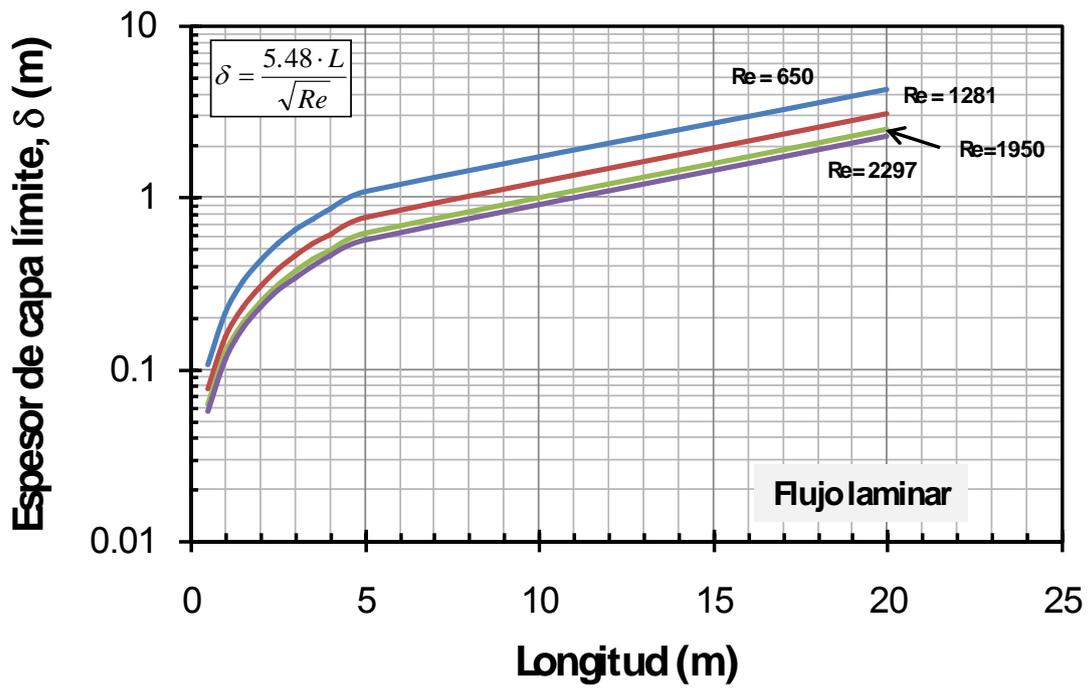


Figura 4.3 Estimación del espesor de la capa límite para flujos laminares en función de la longitud en la dirección del flujo.

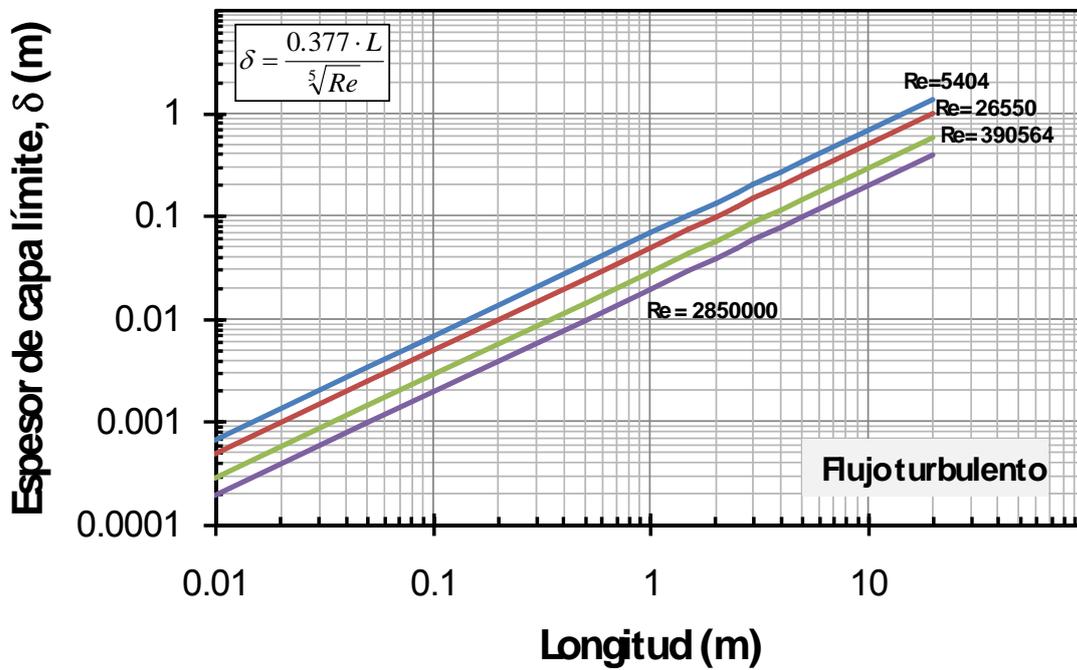


Figura 4.4 Estimación del espesor de la capa límite para flujos turbulentos en función de la longitud en la dirección del flujo.

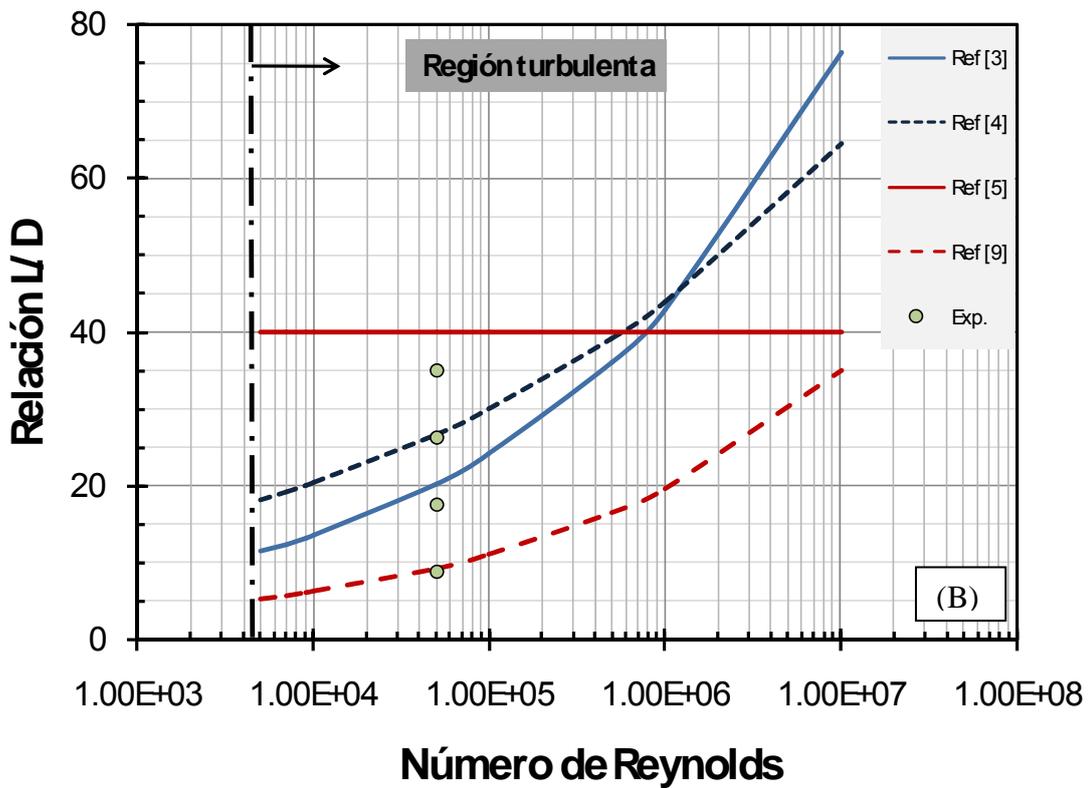
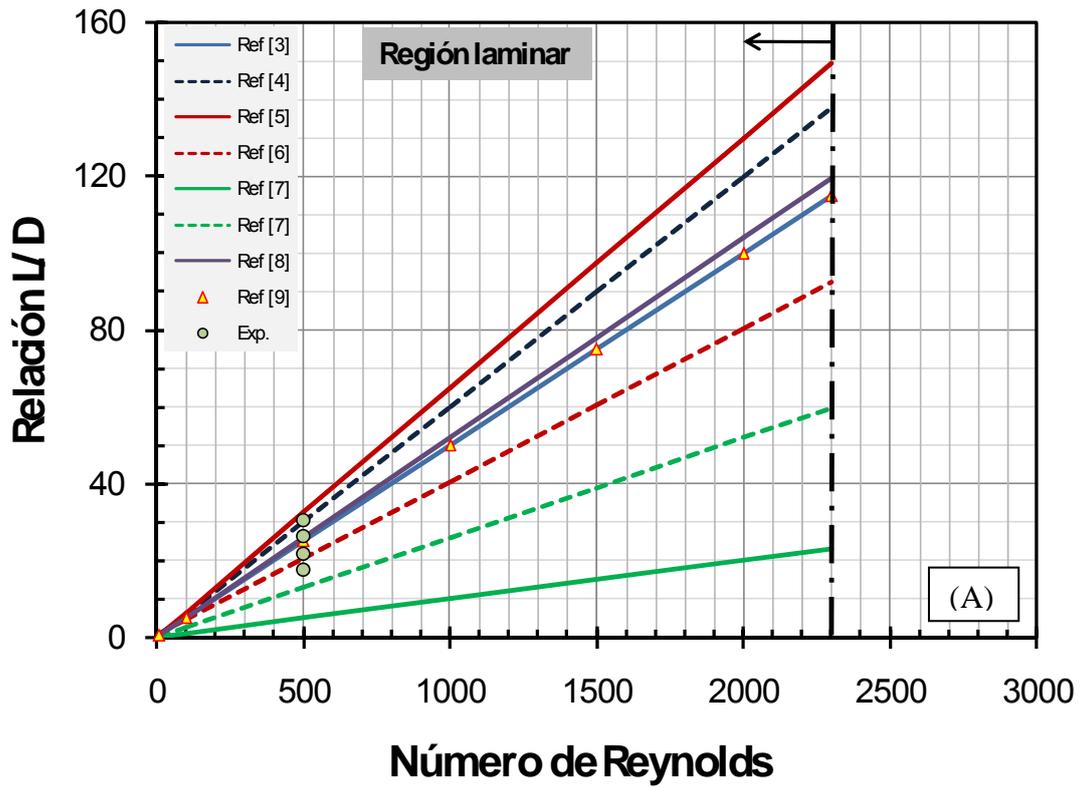


Figura 4.5 Determinación de la relación L/D para (a) flujo laminar, (b) flujo turbulento.

### 4.3 DISEÑO DE LA INSTALACION

En base al análisis de capa límite, el diseño de la instalación experimental queda de la siguiente manera:

Longitud de entrada: 3 m

Longitud de descarga: 1.5 m

Diámetro de la tubería: 0.057 m

Material de la tubería: Acrílico

Toma de presión 1: 0.057 m antes del sensor

Toma de presión 2: 0.03 m después del sensor

Toma de presión 3: A la mitad del espesor del sensor únicamente cuando se mida el flujo con la placa de 0.023 m de espesor.

### 4.4. DISEÑO DE LA INSTALACION SEGUN LA NORMA ISO 5167.

La norma que rige el diseño e instalación de medidores de flujo de presión diferencial es la ISO 5167. La cual recomienda que para determinar adecuadamente la longitud de entrada se debe tomar en cuenta del diámetro de la tubería, dimensiones de la placa de orificio y accesorios (válvulas, codos) instalados en la tubería donde se encuentra el sensor de medición de flujo.

Por lo tanto se requiere determinar la relación de diámetros  $\beta$  que se obtiene mediante la ecuación (3):

$$\beta = \frac{d}{D} \quad (3)$$

Donde:  $\beta$  = Relación de diámetros,  $d$  = Diámetro del orificio de la placa (m)

$D$  = Diámetro de la tubería (m)

Considerando que la configuración de la tubería en estudio consta de 2 codos de 90° de curvatura suave, uno a la entrada y otro a la salida de la tubería (figura 4.6), que la relación  $\beta$  es 0.44, la longitud mínima de entrada recomendada es 0.741 m (13D) y la longitud a la descarga es de 0.285 m (5D).

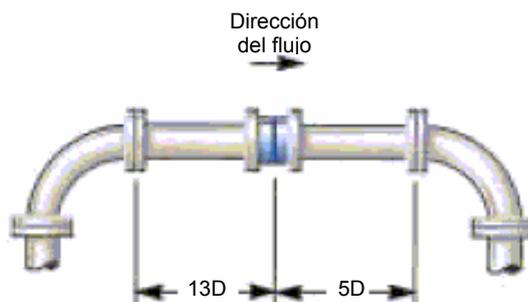


Figura 4.6 Diagrama de la configuración de la tubería donde se encuentra el sensor de placa de orificio

#### 4.5 RESUMEN

En la figura 4.3 y 4.4 se puede observar que a partir de 2 m de longitud prácticamente no existen cambios en la pendiente de las curvas longitud – espesor de capa límite, por lo que se puede considerar que el flujo se encuentra totalmente desarrollado. Con este análisis se determinó que la longitud para tener un flujo totalmente desarrollado es de entre 2 m. Sin embargo, debido a la posición (horizontal) del tubo principal, éste no se llena de manera uniforme, requiere de tiempo y distancia mayores para desarrollarse, por lo cual a la longitud estimada de tubería recta previa a la placa de orificio se le agregó un metro para asegurar un flujo totalmente desarrollado al momento de realizar la medición con la placa de orificio; quedando la longitud total antes de la placa de orificio de 3 m.

Se puede observar que según el análisis de capa límite para las condiciones establecidas en este estudio, la longitud recomendada por la norma ISO 5167 no es suficiente para asegurar un flujo totalmente desarrollado

#### 4.6 REFERENCIAS

1. <http://www.globalw.com/support/strflow.html>
2. Hughes W F, Dinámica de Fluidos, Mc. Graw Hill, México,

p 76

3. Cengel YA, Cimbala JM, Fluid mechanics: fundamentals and applications, McGraw Hill Higher Education, USA, 2006
4. Munson BR, Young DF, Okiishi TH, Fundamentals of Fluid Mechanics 5th Ed., Wiley, USA, 2006, p 405
5. Potter MC, Wiggert DC, Mechanics of Fluids 2nd Ed., Prentice Hall, USA, 1997, p 260
6. Middleman S, An introduction to Fluid Dynamics, Principles of analysis & design, Wiley, USA, 1998
7. Bejan A, Convection Heat Transfer 3rd Ed., Wiley, USA, 2004
8. Arpaci VS, Larsen PS, Convection Heat Transfer, Prentice Hall, USA, 1984
9. Latzko H, Z. Angew. Math. Mech. 1, 1921, p 268
10. Smits, Mecánica de Fluidos, Una introducción física, Alfaomega, México, p 330
11. Boletín Técnico de Spirax Sarco Ltd. Orifice Plate Flowmeters for Steam, Liquids and Gases. Spirax-Sarco Limited, Charlton House, Cheltenham, Gloucestershire, GL53 8ER UK.

## 5. EXPERIMENTACION.

En el capítulo 4 se determinaron las dimensiones de la tubería principal para la localización del sensor de flujo dentro de la instalación experimental. En este capítulo se describen los componentes de tal instalación, tanto el sistema de alimentación y descarga como las placas de orificio utilizadas e instrumentos de medición de presión y volumen, así como la metodología que se utilizó para la medición de flujo en tal instalación.

### 5.1. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO.

El equipo experimental consta de un circuito hidráulico conformado por cuatro secciones que se muestran en la figura 5.1, las cuales se explicarán a detalle posteriormente:

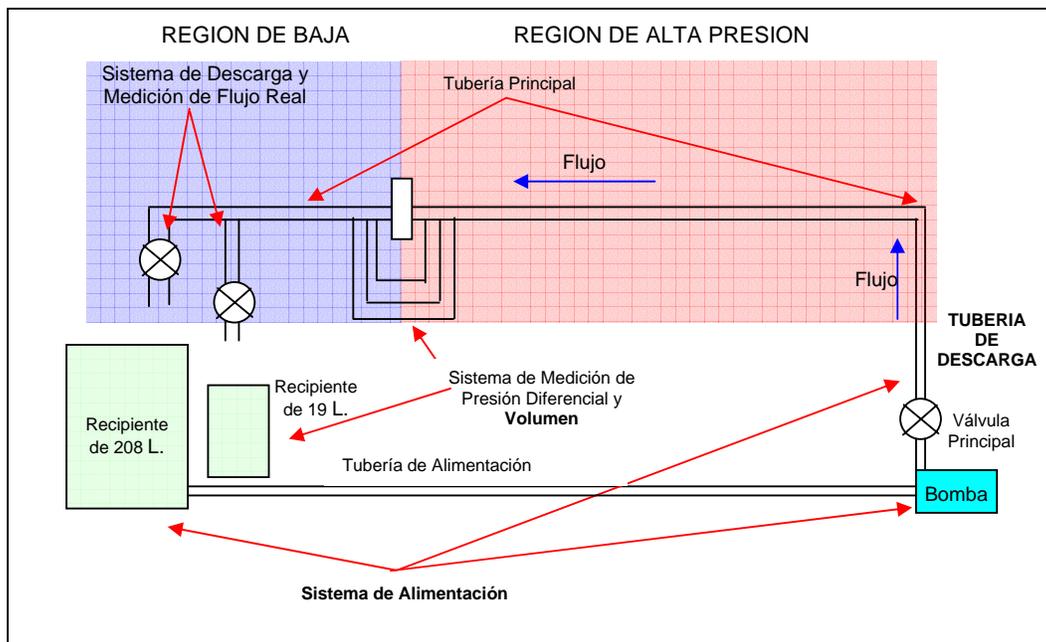


Figura 5.1. Diagrama de la Instalación

a) **Sistema de Alimentación.** Consta de una bomba centrífuga de 2 HP marca WEG modelo 1UTRICGNXT002020, a la cual se acopla la tubería de succión de 0.05 m de diámetro y la tubería de descarga de 0.038 m de diámetro, el cual es reducido a 0.0254 m.

El flujo de agua se regula mediante una válvula de globo comercial de 0.0254 m a la descarga de la bomba, la cual obtiene el agua de un tanque de 208 L. de capacidad.



Figura 5.2. Bomba centrífuga

**b) Tubería Principal.** Es una tubería de acrílico de 0.057 m de diámetro con un espesor de 0.003 m. Esta tubería tiene una longitud total de 4.5 m. En esta sección se encuentra el sensor de placa de orificio y las tomas de presión.



Figura 5.3. Inicio de la tubería Principal

**c) Sistema de medición de presión.** Está formado por tomas de presión estática que se encuentran colocadas sobre la tubería principal (figura 5.5 y 5.6). Las tomas de presión estática son pequeños orificios perforados sobre la pared del ducto perpendiculares a la dirección del flujo en el punto de medición, los cuales detectan el valor local de la presión estática. El diámetro recomendado para la toma de presión es de 1 a 10% el diámetro del ducto [1].

Las tomas de presión pueden ser de tres tipos: Tomas de brida, tomas de vena contracta y tomas de tubería. En las tomas de brida, las tomas de alta y baja presión se localizan a 0.0254 m antes y después de la placa de orificio. En las tomas de vena contracta, la toma de alta presión se localiza a 1D antes de la placa; mientras que la de baja presión se localiza entre 0.3 y 0.8 veces el diámetro después de la placa. En las tomas en la tubería, la toma de alta presión se localiza a 2.5D antes de la placa y la de baja presión se localiza a 8D después de la placa de orificio [2].



Figura 5.4. Placa de Orificio y Tomas de Presión en la Tubería Principal

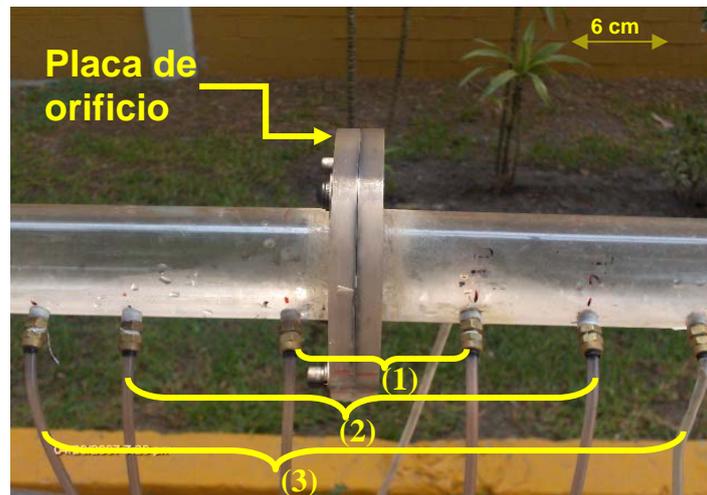


Figura 5.5. Tomas de presión estática con la placa de orificio de 0.0015 m de espesor

En base a lo anterior, las tomas de presión se localizaron de la siguiente manera:

- Tomas de presión 0\*. La toma de alta presión se localiza a 0.057 m (1D) del borde de la placa de orificio y la toma de baja presión se localiza al centro del espesor de la placa de orificio con el fin de comparar la variación en la medición del flujo al momento de pasar por la placa (figura 5.7) con respecto a la medición de flujo con la localización recomendada de tomas de presión. Estas tomas de presión se utilizaron únicamente cuando se midió el flujo con la placa de orificio de 0.023 m de espesor.
- Tomas de presión 1 (Vena contracta). La toma de alta presión se localiza a 0.057 m (1D) del borde de la placa de orificio y la toma de baja presión se localiza a 0.028 m (0.5D) del borde de la placa de orificio a la descarga. La localización de esta se determinó en base a la literatura [2].
- Tomas de presión 2\*. La toma de alta presión se localiza a 0.114 m (2D) del borde de la placa de orificio y la toma de baja presión se localiza a 0.114 m (2D) del borde de la placa de orificio. La localización de estas tomas de presión fue propuesta para medir el flujo en locaciones distintas a las especificadas con la intención de verificar la precisión de las mediciones hechas con las tomas de presión 1.
- Tomas de presión 3\*. La toma de alta presión se localiza a 0.171 m (3D) del borde de la placa de orificio y la toma de baja presión se localiza a 0.16 m (2.8D) del borde de la placa de orificio. La localización de esta toma de presión tampoco siguió alguna especificación.

Para medir la diferencia de presión producida por la placa de orificio, las tomas de presión se conectan mediante mangueras a un medidor de presión diferencial. En este estudio la diferencia de presión es medida mediante manómetros tipo "U" de Mercurio. Para determinar la caída de presión, se colocó detrás de los manómetros papel milimétrico, a partir del cual se determino la misma.

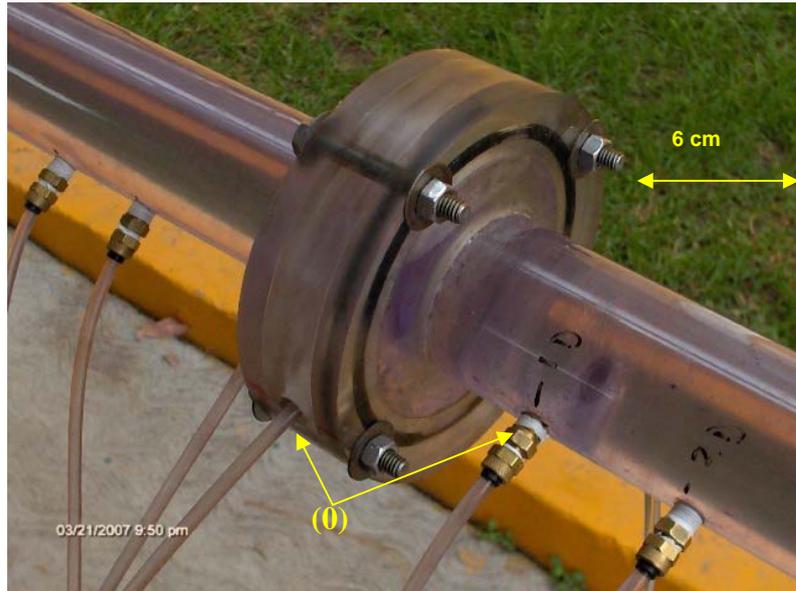


Figura 5.6. Localización de las tomas de presión estática con la placa de orificio de 0.023 m de espesor

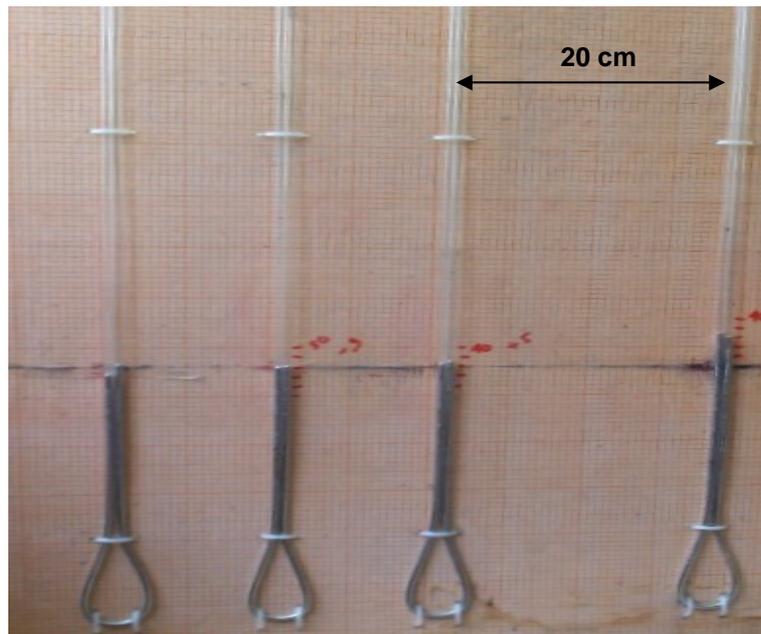


Figura 5.7. Manómetros tipo "U" de Mercurio

**d) Sistema de Descarga y Medición Flujo Real.** Para la medición del volumen que se utiliza para la determinación del flujo real, se dirigió el flujo hacia un recipiente de volumen conocido, en este caso 19 L. y medir el tiempo que tarde en llenarse este volumen. Para lo cual se requiere de un sistema de

válvulas a la descarga de la tubería principal que se muestra en la figura 5.8. Para verificar la precisión de estas mediciones, a la vez de determinar el volumen, también se determinó el peso del contenedor del agua durante su llenado; para esto se utilizó una báscula con capacidad de 50 kg.



Figura 5.8 Sistema de Descarga y Medición de Flujo Real

## 5.2 DISEÑO DE LAS PLACAS DE ORIFICIO.

Las placas de orificio utilizadas tienen las siguientes características:

- Placa de 0.0015 m de espesor con ángulo de 45° a la descarga.
- Placa de 0.0015 m de espesor sin ángulo a la descarga.
- Placa de 0.023 m de espesor con ángulo de 45° a la descarga.
- Placa de 0.023 m de espesor sin ángulo a la descarga.

El espesor  $E$  (Figura 5.9) de la placa de orificio depende del tamaño de la tubería así como de la temperatura de operación. Para tuberías de hasta 0.1016 m de diámetro el espesor recomendado de la placa de orificio es 0.0015 m [2].

En base a lo anterior, se utilizaron placas de 0.0015 m de espesor. Las placas de 0.023 m de espesor se utilizaron para poder colocar una toma de presión al centro del espesor de la placa y poder medir la presión estática dentro del propio sensor de placa de orificio.

En la figura 5.9 se muestra el corte transversal de una placa de orificio de 0.023 m de espesor donde se muestran las variables que se toman en cuenta para su diseño.

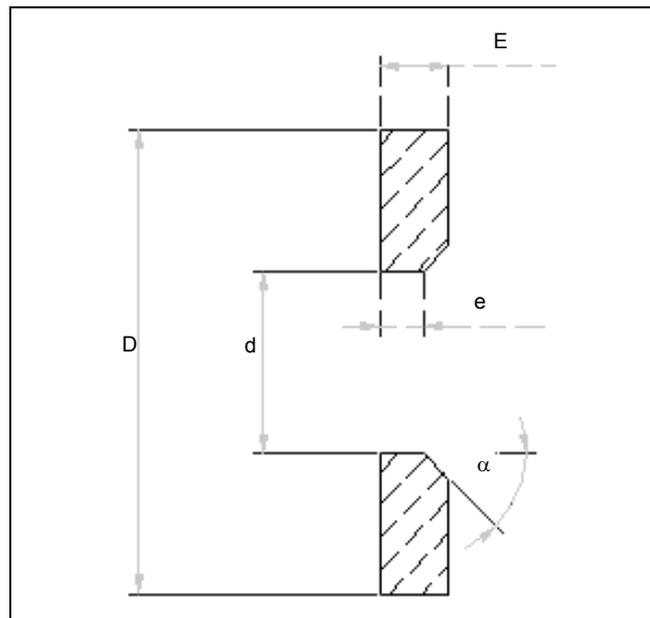


Figura 5.9 Corte transversal de una placa de orificio

Donde:  $D$  es el diámetro de la tubería (m),  $d$  es el diámetro del orificio de la placa (m),  $E$  es el espesor total de la placa (m),  $e$  es el espesor de la placa antes del bisel a la descarga (m),  $\beta$  es la relación de diámetros ( $d/D$ ),  $\alpha$  es el ángulo a la descarga de la placa de orificio ( $^{\circ}$ ).

Un factor muy importante que se considera para el diseño e instalación de placas de orificio es la relación de diámetros  $\beta$ . Se recomienda que el valor de este parámetro se encuentre entre 0.2 y 0.75 [3]. Así mismo, se sugiere que el espesor de la placa en función del diámetro de la tubería se encuentre entre  $0.005D - 0.05D$  [3]. En el caso de que el espesor  $e$  sea menor que  $E$  se le hace un bisel de  $45^\circ$  a la descarga de la placa [3].

Considerando que el diámetro de la tubería es 0.057 m y proponiendo una relación de diámetros ( $\beta = d/D$ ) de 0.43. El diámetro del orificio de la placa es de 0.025 m. En la figura 5.10 se muestra el diagrama de la placa de orificio de 0.0015 m de espesor sin ángulo a la descarga. En el apéndice A.I se encuentran los diagramas de las otras placas de orificio utilizadas.

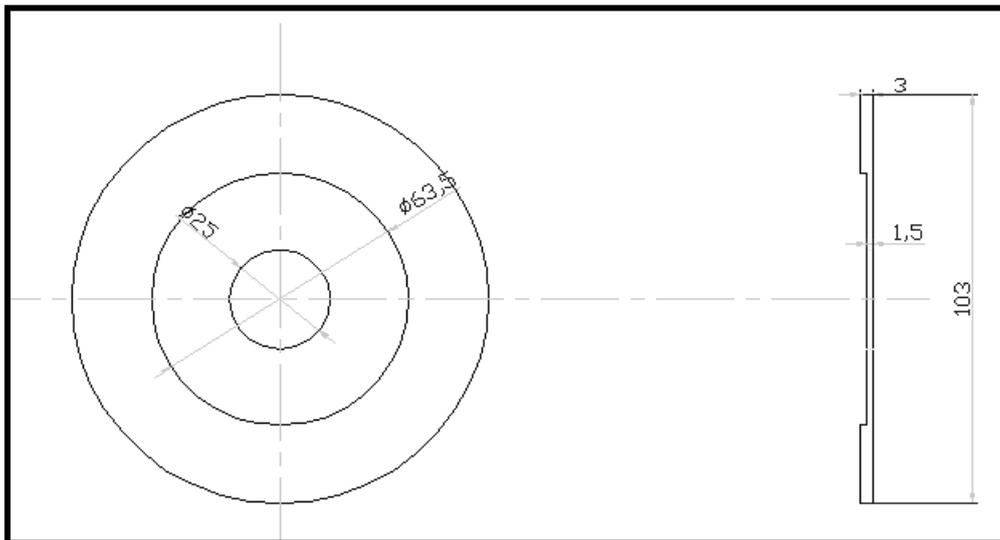


Figura 5.10 Placa de Orificio de 0.0015 m de espesor sin ángulo a la descarga

### 5.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para la experimentación se utilizaron diferentes flujos, los cuales son caracterizados con el número de Reynolds, el flujo es regulado mediante la válvula que se encuentra a la descarga de la bomba. A cada flujo le corresponderá una posición de la válvula. La apertura de la válvula se divide en sextos de una vuelta entera.

Los números de Reynolds aproximados y su correspondiente posición de la válvula se muestran en la tabla 5.1:

Tabla 5.1 Posición de la válvula correspondiente a números de Reynolds aproximados

Reynolds	Posición de la válvula
15000	5/6
20000	6/6
30000	8/6
45000	12/6
50000	18/6
50000	20/6

El procedimiento experimental consiste de las siguientes etapas:

- a) **Colocación de las placas de orificio.** El sistema esta diseñado para trabajar con placas de orificio de diferentes características ya descritas en la sección 5.2. En este estudio se utilizan 4 placas de orificio diferentes, por lo tanto se debe repetir el mismo procedimiento experimental para cada placa utilizada.
  
- b) **Calibración de los manómetros.** Se debe eliminar el aire que se queda atrapado en las mangueras de los manómetros y asegurarse que únicamente haya agua y mercurio en ellos. Una vez eliminado el aire, se igualan los niveles de mercurio de cada manómetro. Una vez nivelados, se cierran las válvulas de los manómetros.

Para asegurar que las líneas de presión conectadas a la tubería principal no tengan aire, se requiere hacer funcionar el equipo de modo que el aire atrapado ellas se salga y quede únicamente agua en ellas. Posteriormente se conectan las mangueras a los manómetros y se abren sus válvulas de los mismos.

- c) **Establecimiento, desarrollo y medición de flujo.** Una vez que el equipo se encuentra funcionando, se pone la válvula en la posición deseada según el flujo que se vaya a analizar dejando que el mismo se desarrolle durante 10 min. Después de 10 min se toman las lecturas de diferencia de presión de los manómetros diferenciales correspondientes a las tomas de presión descritas en la sección 5.1 y se registran tales mediciones.

Se requiere conocer el flujo real en la tubería para lo cual se abre la válvula de descarga 2 y se cierra la válvula de descarga 1. Ahora el flujo es dirigido a otro recipiente donde se espera que se desarrolle el flujo y posteriormente se introduce el recipiente de 19 L. y se mide el tiempo en el que se llena este volumen con un cronómetro. Una vez alcanzado tal volumen se detiene el cronómetro y se registra tal medición.

Este procedimiento se repite cada 10 min durante 90 min, es decir, se realizan 9 mediciones para cada flujo.

#### 5.4 REFERENCIAS

1. Figliola, B., Mediciones Mecánicas -Teoría y Diseño 3ª Edición. Alfaomega, México D.F. 2003. pp. 397, 398.
2. Villalobos, G. Medición de flujo - Placas de Orificio, Toberas de Flujo y Tubos de Venturi, Limusa – Noriega, México D.F. pp. 25 – 32
3. Rivas, I., Placa de Orificio, Serie Autodidáctica de Medición del Agua. Subdirección General de Administración del Agua. Coordinación de Tecnología Hidráulica.

## **CAPITULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En el capítulo 3 se describió la metodología seguida para realizar la simulación numérica del flujo de fluidos a través de una placa de orificio montada en una tubería de acrílico de 0.057 m de diámetro interno. En tal capítulo se mostraron los flujos obtenidos numéricamente mediante la integración del perfil de velocidad que se produce por la capa límite, así como el flujo determinado con la diferencia de presión en la reducción del área transversal al flujo debido a la placa de orificio. También se muestra que la simulación numérica en 3-D funciona mejor para el análisis de flujos turbulentos en comparación con la simulación en 2-D.

Por su parte, en los capítulos 4 y 5 se describió el diseño y la elaboración de la instalación experimental utilizada. Se determinó la longitud de tubería necesaria para obtener un flujo totalmente desarrollado, la localización adecuada del sensor de medición de flujo, así como la localización de las tomas de presión estática asignándole a cada conjunto de tomas de alta y baja presión los números 0, 1, 2 y 3, así como instrumentos de medición de presión y flujo, además del diseño de las placas de orificio.

También se describió la metodología para la medición de flujo con las diferentes placas de orificio diseñadas para este trabajo. El flujo real se determinó midiendo el tiempo en el que se llena un volumen conocido (19 L.). Finalmente, el flujo calculado con la placa de orificio se determinó con la diferencia de presión producida por la misma placa, midiendo la diferencia de altura en los manómetros en “U” de mercurio conectados a tomas de alta y baja presión estática colocadas sobre la superficie de la tubería.

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos experimentalmente con las placas de orificio indicadas en la tabla 6.1 y se hace una comparación para determinar la localización de tomas de presión que se aproxime de mejor manera al flujo real.

Finalmente se hace una comparación entre los resultados obtenidos con las simulaciones numéricas en 3-D y los resultados obtenidos experimentalmente.

## 6.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES

En esta sección se presentan los resultados obtenidos experimentalmente de la medición de flujo en la instalación diseñada para este trabajo con las placas de orificio que se muestran en la tabla 6.1

Tabla 6.1 Placas de orificio utilizadas para la medición de flujo

No. De Placa	Espesor (m)	Diámetro del orificio (m)	Ángulo a la descarga
1	0.0015	0.025	0°
2			45°
3	0.0023	0.025	0°
4			45°

De las placas de orificio indicadas en la tabla 6.1, las placas 1 y 2 cumplen la especificación de espesor recomendado por la norma ISO 5167-2 2003 [1], la cual también recomienda hacer un bisel con ángulo de 45° a la descarga para el tipo de placa que se está utilizando.

Las placas 3 y 4 exceden el espesor recomendado por tal norma, con el fin de comprobar como afecta la medición de flujo variando espesor y ángulo a la descarga de la placa, además de medir el flujo con la toma de baja presión dentro de la misma placa de orificio.

Los resultados de la medición de flujo presentan la variación del mismo en función del número de Reynolds, tanto el flujo real como el calculado con la  $\Delta P$  producida por la placa de orificio. Recordando que la  $\Delta P$  se midió a diferentes posiciones de las tomas de presión sobre la tubería. Es decir, para los diferentes conjuntos de tomas de presión (0, 1, 2 y 3) descritas en el capítulo 5. Además, se hace una comparación contra el flujo teórico, el cual se calculó sin

considerar pérdidas de presión de ningún tipo, proponiendo un número de Reynolds, empleando la ecuación (1), descrita a continuación:

$$Q_{teórico} = \frac{0.25 \times \pi \times D \times Re \times \mu}{\rho} \quad (1)$$

Donde:

$Q_{Teórico}$  = Flujo sin pérdidas;  $V$  = Velocidad;  $Re$  = Número de Reynolds;  $\mu$  = Viscosidad dinámica  $\left(\frac{Ns}{m^2}\right)$ ;  $\rho$  = Densidad ( $m^3/s$ );  $D$  = Diámetro de la tubería;  $A$  = Área de la sección transversal al flujo ( $m^2$ )

Las figuras 6.1 y 6.2 muestran los resultados experimentales medidos con las placas de orificio de 0.0015 m de espesor. Donde cada una de las líneas representa la tendencia de la variación del flujo medido con la  $\Delta P$  en cada conjunto de tomas de presión, flujo real y flujo teórico.

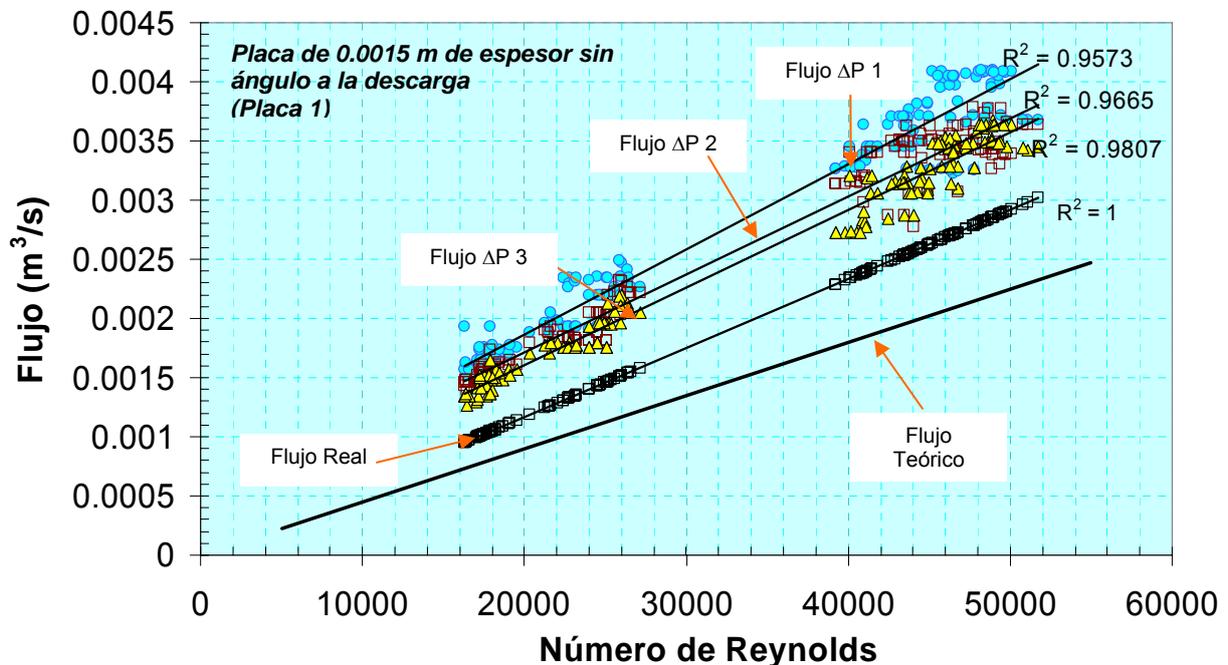


Figura 6.1. Medición de flujo con la placa de orificio de 0.0015 m de espesor sin ángulo a la descarga

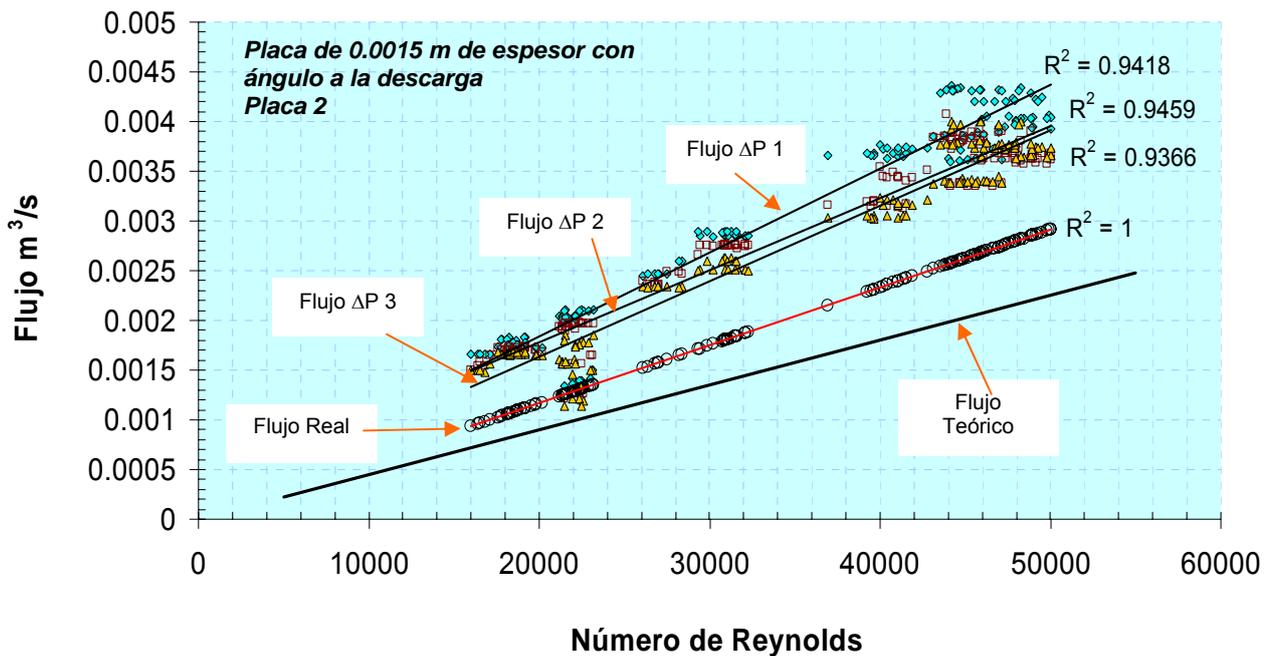


Figura 6.2. Medición de flujo con la placa de orificio de 0.0015 m de espesor con ángulo a la descarga

Como se puede observar en las figuras 6.1 y 6.2, existe diferencia entre el flujo real y el flujo teórico lo cual se debe a diferentes factores como lo son la pérdida de presión generada por la placa de orificio, además de pérdidas por rozamiento, las cuales son mínimas debido a que el material es prácticamente liso. También existen pérdidas de presión debido a variaciones de presión a la descarga de la bomba generadas por variaciones de voltaje, lo cual dificulta mantener flujos uniformes. Sin embargo, para fines prácticos en procesos industriales, el flujo teórico no se presenta.

Así mismo, se puede observar que existe un comportamiento lineal entre el número de Reynolds y el flujo, tanto el real, como el medido con la placa de orificio, lo cual es de esperarse ya que el flujo es directamente proporcional al número de Reynolds. También se puede observar que existe poca dispersión entre los datos experimentales como lo indica el coeficiente de correlación  $R^2$ .

En la figura 6.3 se compara la medición de flujo con la  $\Delta P$  medida en los diferentes conjuntos de tomas de presión con las placas 1 y 2.

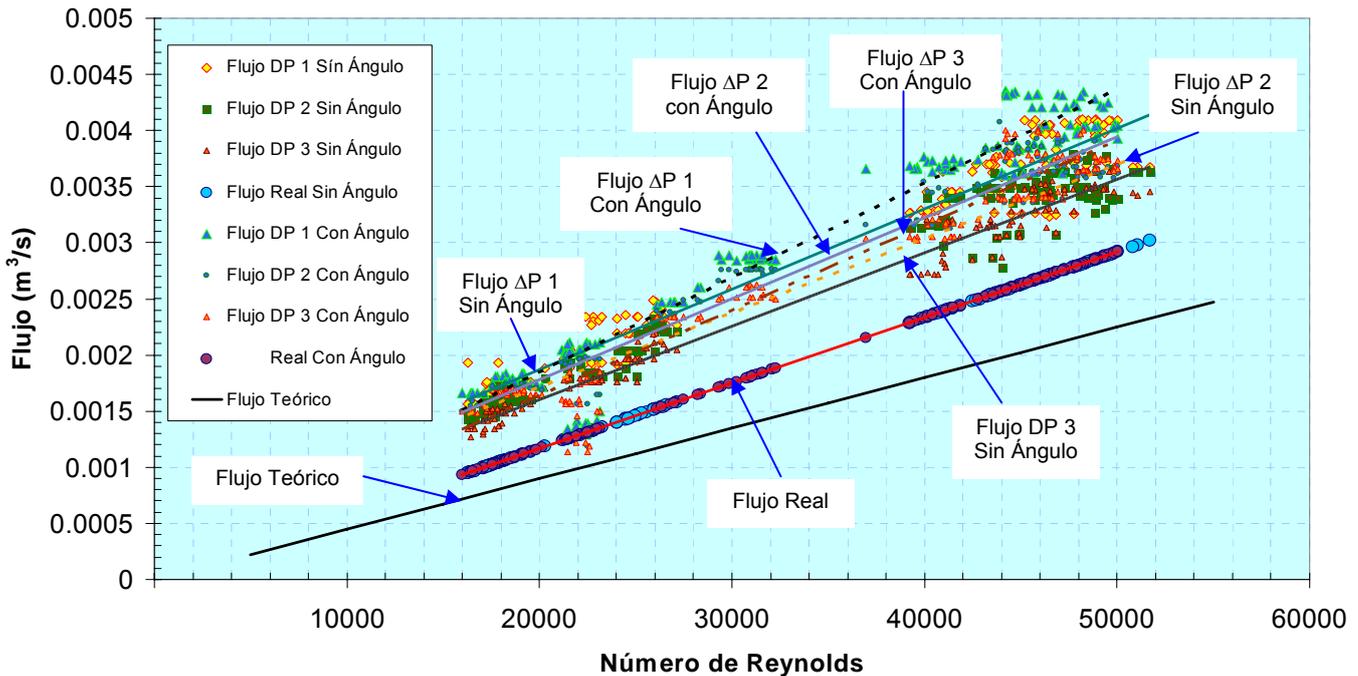


Figura 6.3. Medición de flujo con las placas de 0.0015 m de espesor con y sin ángulo de 45° a la descarga

Se puede observar que los resultados de flujo calculados con la  $\Delta P$  medida con las tomas de presión 3, las cuales se encuentran a 0.171 m (3D) antes y después de la placa de orificio, presentan una mayor aproximación al flujo real en comparación con las mediciones realizadas con las tomas de presión 1 y 2. Estas tomas de presión no se instalaron de acuerdo a norma ISO 5167-2 [1]. Por otro lado, presentaron menos fluctuaciones en los niveles de mercurio de los manómetros en “U” debidas a la naturaleza turbulenta del flujo, es decir, el flujo en estos puntos se encuentra mejor desarrollado en comparación con las regiones cercanas a la placa de orificio.

En las figuras 6.4 y 6.5 se muestra el comportamiento de la medición de flujo con de las placas de orificio de 0.023 m de espesor (placas 3 y 4), donde se puede observar que las mediciones de flujo con la placa de orificio sin ángulo a la descarga presentan una mayor aproximación al flujo real en comparación con las mediciones realizadas con la placa de orificio con ángulo de 45° a la descarga.

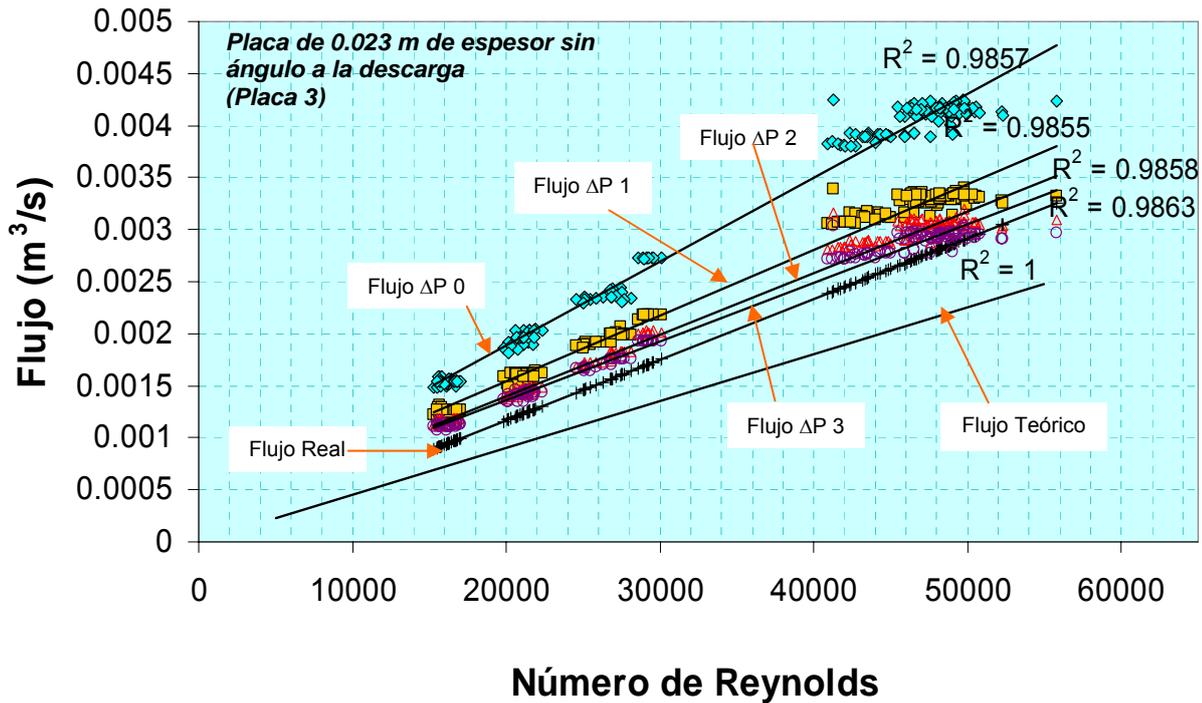


Figura 6.4 Medición de Flujo con la placa de orificio de 0.023 m de espesor sin ángulo a la descarga.

De manera similar a las mediciones de flujo volumétrico realizadas con las placas de orificio de 0.0015 m de espesor, en las mediciones de  $\Delta P$  realizadas con las placas de 0.023 m de espesor, el flujo calculado con la  $\Delta P$  medida con las tomas de presión 3 presentan una mayor aproximación al flujo real.

Se puede observar que el cálculo de flujo con las mediciones de  $\Delta P$  con las tomas de presión 0 son las que se encuentran más alejadas de las mediciones de flujo real, es decir, entre más cerca de la placa de orificio se mida la diferencia de presión, más se alejan los resultados de flujo medido con la placa de orificio del flujo real, además de que se presentan fluctuaciones grandes en los niveles de mercurio en los manómetros en "U" dificultando su medición. Estas variaciones se deben a que dentro de la constricción de la placa de orificio, el flujo es distinto a aquel dentro de la tubería. Ya que el área por la cual pasa el fluido disminuye, la ley de conservación de la masa produce un incremento a la velocidad del fluido, por lo tanto, las lecturas que se obtienen corresponden a las de un flujo distinto al que en realidad se desea estimar.

Cabe mencionar que las posiciones recomendadas por la norma [1] son: Toma de alta presión a 1D antes de la placa y la de baja presión a D/2 después de la placa, otro conjunto de tomas de presión a 0.0254 m antes de la placa para la toma de alta presión y a 0.0254 m después de la placa para la toma de baja presión y por último, la toma de alta presión sobre la cara de entrada y la toma de baja presión y sobre la cara de descarga de la placa de orificio. Por lo tanto, la posición propuesta para este trabajo a 0.171 m (3D) antes y después de la placa permite que el flujo a la descarga se desarrolle al momento de tomar la presión, lo cual proporciona resultados más exactos y con mayor facilidad de medición.

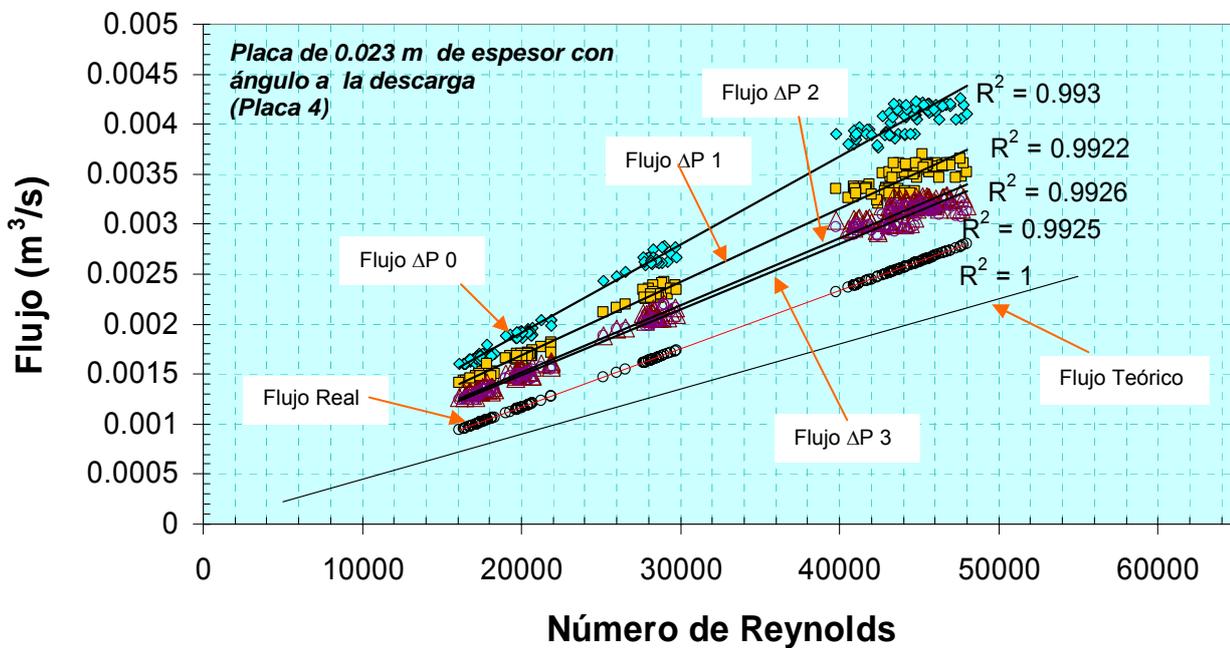


Figura 6.5 Medición de Flujo con la placa de orificio de 0.023 m de espesor con ángulo a la descarga.

En la figura 6.5 se puede observar que de manera similar a los resultados de la medición de flujo con la placa de orificio sin ángulo a la descarga la medición de  $\Delta P$  con las tomas de presión 3 presentan una mayor aproximación al valor del flujo real.

Como se puede ver en la figura 6.6, donde se comparan las mediciones de flujo con la  $\Delta P$  medida en las tomas de presión 3 (las cuales se demostró, tienen la

mayor aproximación al flujo real). Las mediciones realizadas con la placa de orificio sin ángulo a la descarga se aproximan más al flujo real en comparación con las mediciones con la placa de orificio con ángulo a la descarga.

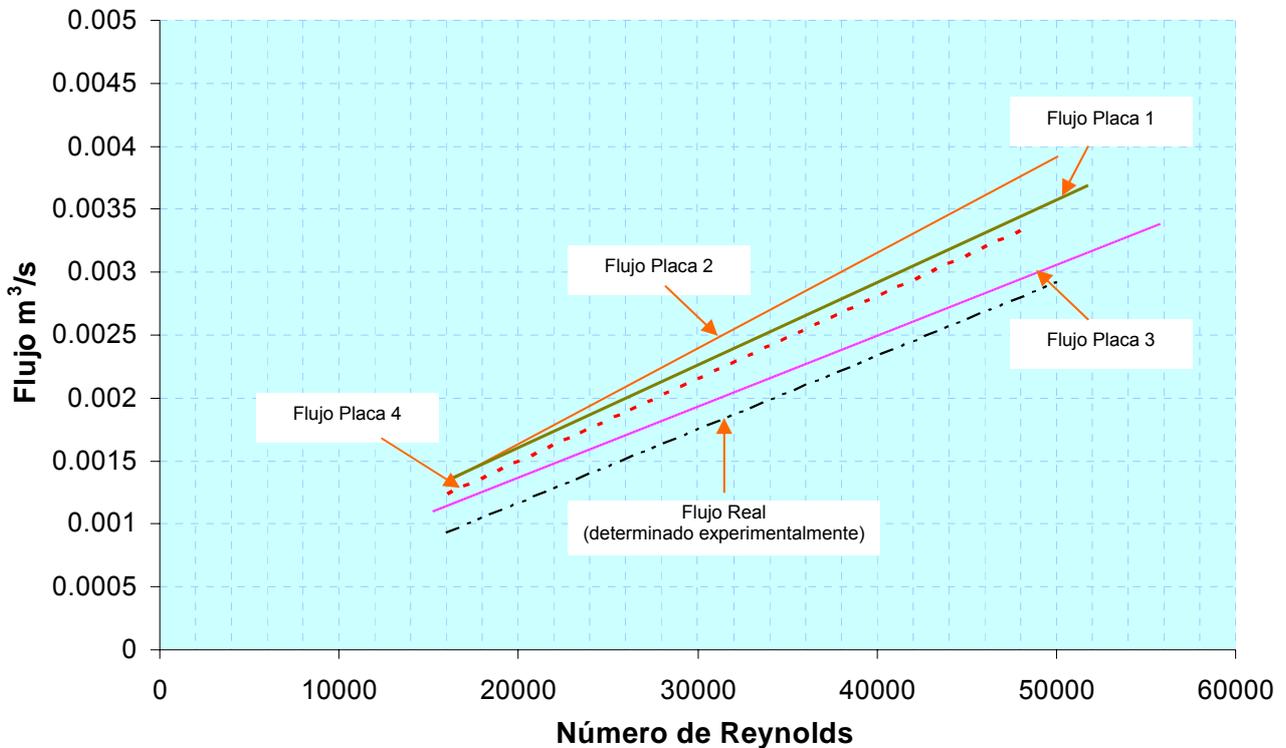


Figura 6.6 Líneas de tendencia de medición de Flujo con diferentes placas de orificio con las tomas de presión 3.

Para saber cuanto se desvían los resultados de la medición de flujo con la placa de orificio de los resultados de medición de flujo real y determinar la eficiencia del medidor de flujo, se calcula el porcentaje de desviación con la ecuación (2), así como del coeficiente de descarga.

$$\% \text{Desviación} = \frac{Q_{\Delta P} - Q_{Real}}{Q_{Real}} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

$Q_{\Delta P}$  = Flujo calculado con la diferencia de presión producida por la placa de orificio ( $m^3/s$ );  $Q_{Real}$  = Flujo calculado midiendo el tiempo en que se llena un volumen definido ( $m^3/s$ )

En la literatura [1-4] se reportan diferentes maneras de determinar el coeficiente de descarga, el cual es la relación que existe entre el flujo real que pasa por un medidor entre el flujo ideal. Esta diferencia entre flujos existe debido a los efectos de fricción y de los efectos de vena contracta ocasionados por la geometría de la placa de orificio [2].

El coeficiente de descarga se multiplica al valor de la medición de flujo calculado con la  $\Delta P$  generada por la placa de orificio con el fin de aproximar este flujo al valor de flujo real. Es decir, es una manera de “arreglar” el flujo determinado con la placa de orificio.

Según la literatura [1-3], una de las formas más populares para la determinación del coeficiente de descarga es mediante las ecuaciones (4) y (5), de las cuales, la ecuación (5) es recomendada por la norma ISO 5167-2 [1]. El coeficiente de descarga también puede ser determinado mediante una norma de referencia o mediante la calibración de la placa de orificio contra algún sistema de referencia de medición de flujo de fluidos [3].

$$CD = \frac{Q_{Real}}{Q_{\Delta P}} \quad (3)$$

$$C_D = 0.5959 + 0.031\beta^{2.1} - 0.184\beta^8 + \frac{91.71\beta^{2.5}}{Re^{0.75}} \quad (4)$$

$$C_D = 0.5961 + 0.0261\beta^2 - 0.216\beta^8 + 0.000521\left(\frac{10^6\beta}{Re_D}\right)^{0.7} + (0.0188 + 0.0063A)\beta^{3.5}\left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0.3} + (0.043 + 0.080e^{-10L_1} - 0.123e^{-7L_1})(1 - 0.11A)\frac{\beta^4}{1 - \beta^4} - 0.031(M_2' - 0.8M_2'^{1.1})\beta^{1.3} \quad (5)$$

Donde:

$Q_{\Delta P}$  = Flujo calculado con la diferencia de presión generada por la placa de orificio ( $m^3/s$ );  $Q_{Real}$  = Flujo real que pasa por el medidor de flujo ( $m^3/s$ );  $\beta$  = relación de diámetros;  $L_1$  = Es la relación entre la longitud medida desde la toma de alta presión hasta la cara del lado de entrada a la placa de orificio y el diámetro de la tubería;  $L_2$  = Es la relación entre la longitud medida desde la toma de baja presión hasta la cara del lado de descarga de la placa de orificio y el diámetro de la tubería;  $M_2 = \frac{2L_2'}{1-\beta}$ ;  $A = \left( \frac{19000\beta}{Re_D} \right)^{0.8}$ .

Sin embargo, para el cálculo del coeficiente de descarga con las ecuaciones 4 y 5, la placa de orificio debe estar construida bajo las especificaciones de la norma ISO 5167-2 [1], además, la medición de la presión estática se debe realizar en los lugares indicados por la norma ISO-5167-2 [1]. Por lo tanto, para determinar el coeficiente de descarga para las placas y tomas de presión propuestas para este trabajo se utiliza la ecuación (3). Sin embargo, para las placas de orificio 3 y 4, se ignoró la restricción de dimensiones del instrumento con el fin de comparar los coeficientes de descarga propuestos por la norma ISO 5167-2 [1] contra los obtenidos experimentalmente.

En la tabla 6.2 se muestran los coeficientes de descarga que se obtuvieron para cada placa de orificio utilizada en este trabajo, así como el calculado con la ecuación (5) y los reportados en la literatura [1]

Donde el coeficiente de descarga  $CD_{\Delta P 1}$  y  $CD_{\Delta P 3}$  se calcularon con la ecuación (3) que relaciona el flujo real y el flujo calculado con la  $\Delta P$  medida en las tomas de presión 1 y 3 respectivamente.

Tabla 6.2. Coeficientes de Descarga

Placa de Orificio	Re	CD (Ecuación 5)	CD $\Delta P$ 1 (Ecuación 3)	CD $\Delta P$ 3 (Ecuación 3)	CD ISO 5167-2
1	5000	-	-	-	0.62
	10000	-	-	-	0.61
	18000	0.65	0.60	0.72	-
	20000	0.65	0.62	0.72	0.61
	30000	0.65	0.63	0.73	0.60
	40000	0.65	0.70	0.79	-
2	5000	-	-	-	0.62
	10000	-	-	-	0.61
	16000	0.65	0.63	0.70	-
	20000	0.65	0.62	0.70	0.61
	30000	0.65	0.65	0.73	0.60
	40000	0.65	0.67	0.75	-
3	5000	-	-	-	0.62
	10000	-	-	-	0.61
	16000	0.65	0.73	0.83	-
	20000	0.65	0.74	0.85	0.61
	30000	0.65	0.81	0.90	0.60
	40000	0.65	0.84	0.94	-
4	5000	-	-	-	0.62
	10000	-	-	-	0.61
	16000	0.65	0.68	0.76	-
	20000	0.65	0.68	0.77	0.61
	30000	0.65	0.71	0.81	0.60
	40000	0.65	0.75	0.84	-
48000	0.65	0.75	0.84	0.60	

Como se ha mencionado, la placa de orificio genera una caída de presión y un aumento de velocidad al reducir el área transversal al flujo, idealmente, se espera que la presión después de la placa de orificio recupere su magnitud que tenía antes de pasar por la placa de orificio, sin embargo, esto no ocurre, como se ilustra en la figura 6.7 (ver figura 3.11 a y b)

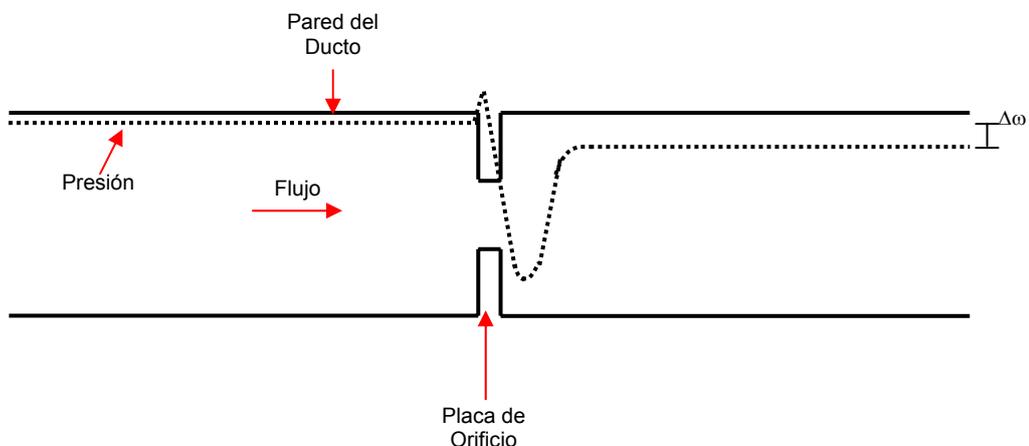


Figura 6.7 Pérdida de presión debido al paso del flujo a través de la placa de orificio.

Para saber cuánta presión se pierde o “no se recupera” debido a la placa de orificio, se determina la constante de pérdida de presión  $\Delta\omega$ , la cual se calcula mediante la ecuación (6) que se describe a continuación [1]:

$$\Delta\omega = \frac{\sqrt{1 - \beta^4(1 - C^2)} - C\beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4(1 - C^2)} + C\beta^2} \Delta P \quad (6)$$

Donde:

$\Delta\omega$  = Pérdida de presión (Pa);  $\beta$  = Relación de diámetros;  $C$  = Coeficiente de Descarga,  $\Delta P$  = Diferencia de presión (Pa).

La pérdida de presión  $\Delta\omega$  es la diferencia que existe entre la presión medida antes de la placa de orificio (aproximadamente 1D antes de la placa) y la presión medida después de la placa de orificio donde se considere que la presión ya recuperó la magnitud que tenía antes de que el flujo cruzara la placa de orificio (aproximadamente 6D después de la placa) [1], sin embargo, esto no ocurre y se puede calcular la constante de pérdida de carga para lo cual se debe conocer el valor del coeficiente de descarga.

Idealmente se espera que  $\Delta\omega = \Delta P$ , sin embargo, esto no ocurre,  $\Delta\omega$  siempre es una fracción de  $\Delta P$ , donde es evidente la dependencia del coeficiente de descarga, de la geometría de la placa de orificio y las dimensiones de la tubería. En la literatura [5] se reportan datos de la relación existente entre el coeficiente de descarga y la constante de pérdida de presión y se recomienda agregar a la norma ISO 5167-1 el coeficiente de pérdida mediante la ecuación (8) descrita a continuación:

$$\zeta = \left[ \frac{\sqrt{1 - \beta^4(1 - C^2)}}{C\beta^2} - 1 \right]^2 \quad (7)$$

Donde:

$\zeta$  = Coeficiente de pérdida;  $\beta$  = Relación de Diámetros;  $C$  = Coeficiente de Descarga.

En la ecuación (7) se puede observar que también existe la dependencia del coeficiente de descarga y de factores geométricos. Como se mencionó, según la norma ISO 5167-2 [1] el coeficiente de descarga se calcula mediante la ecuación 6, la cual únicamente es aplicable bajo las condiciones geométricas especificadas en la norma [1], tales condiciones no son las más adecuadas como se demostró anteriormente. Por lo tanto, el uso de las ecuaciones (6) y (7) es una manera de minimizar el error existente entre el flujo real y el flujo calculado a partir de la caída de presión producida por factores geométricos en el diseño de la placa de orificio y posición de las tomas de presión estática.

Con la ecuación (2) se determinó el porcentaje de desviación del flujo calculado con la  $\Delta P$  producida por la placa de orificio contra el flujo real donde se puede observar que a mayores flujos ésta desviación se reduce (figura 6.8a). Lo cual se debe a que con el aumento de momentum del flujo principal (aumento de velocidad), los esfuerzos generados por los remolinos producidos por la placa de orificio y el flujo principal tienden a alcanzar un estado de equilibrio.

En la figura 6.8 (b) se muestran las barras de error en el cálculo de flujo con la  $\Delta P$  generada con la placa de orificio de 0.0015 m de espesor con ángulo a la descarga y la posición de las tomas de presión recomendadas por la norma y las propuestas para este trabajo, donde se puede observar que el error es consistente con una relación lineal. Además de que a flujos mayores el porcentaje de desviación del flujo medido con la placa se reduce. Es evidente de la figura 6.8 (b) que el medir la  $\Delta P$  cerca de la placa de orificio proporciona un error mayor.

En la figura 6.8 (c) se muestran las barras de error para la medición de flujo con la placa de 0.023 m de espesor sin ángulo a la descarga, en la posición de tomas de presión recomendadas por la norma y las tomas de presión propuestas para este trabajo, la medición de flujo con esta placa presenta una

menor desviación del flujo real, además, de que nuevamente al calcular el flujo con la  $\Delta P$  medida en las tomas de presión 3 (3D antes y después de la placa) tal desviación se reduce.

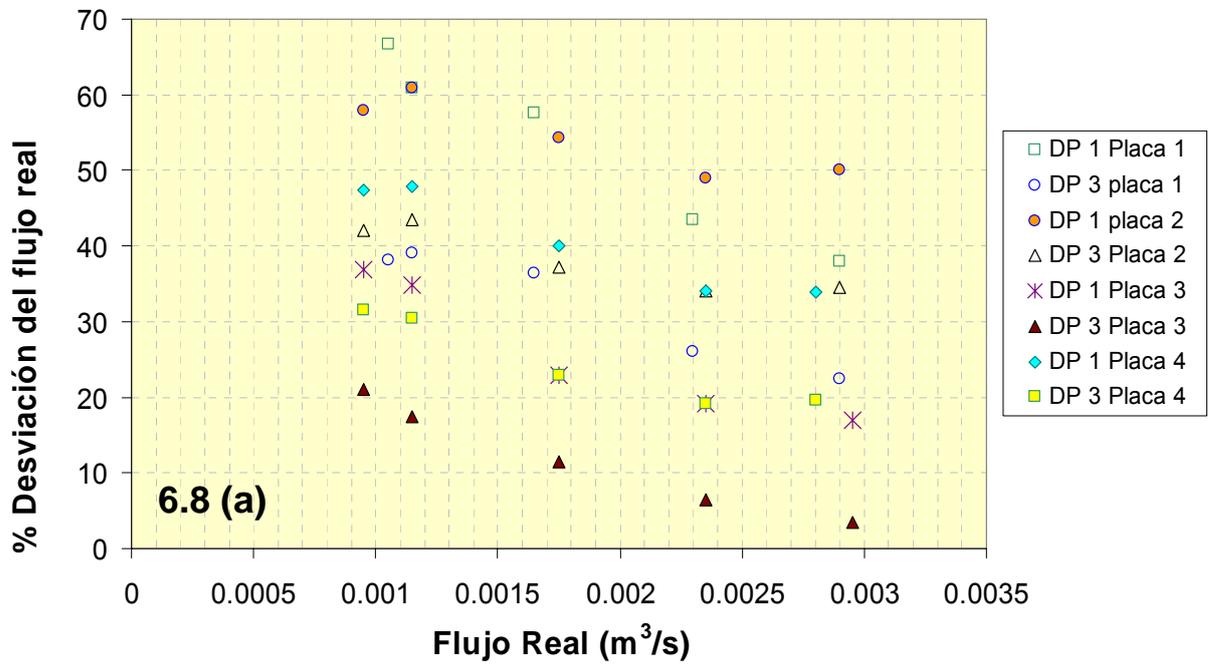


Figura 6.8(a) Porcentaje de desviación del flujo medido con la placa de orificio y el flujo real con las diferentes tomas de presión.

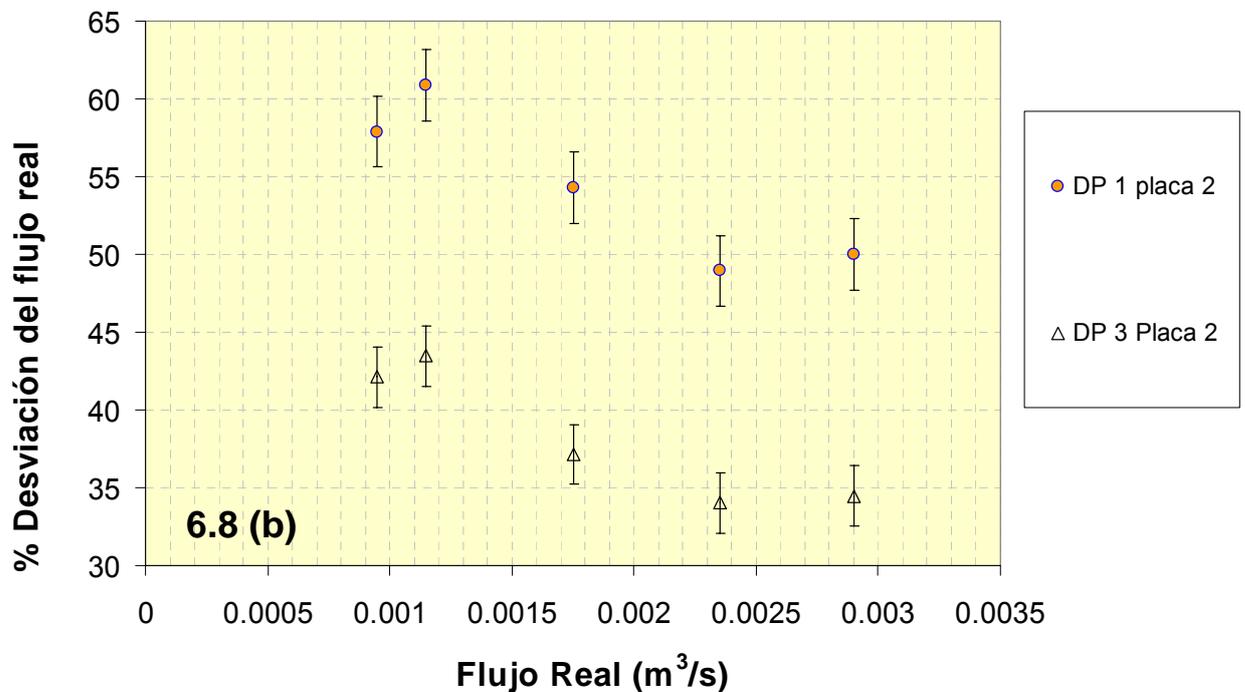


Figura 6.8 (b) Desviación del flujo real para la placa de 0.0015 m de espesor con ángulo a la descarga

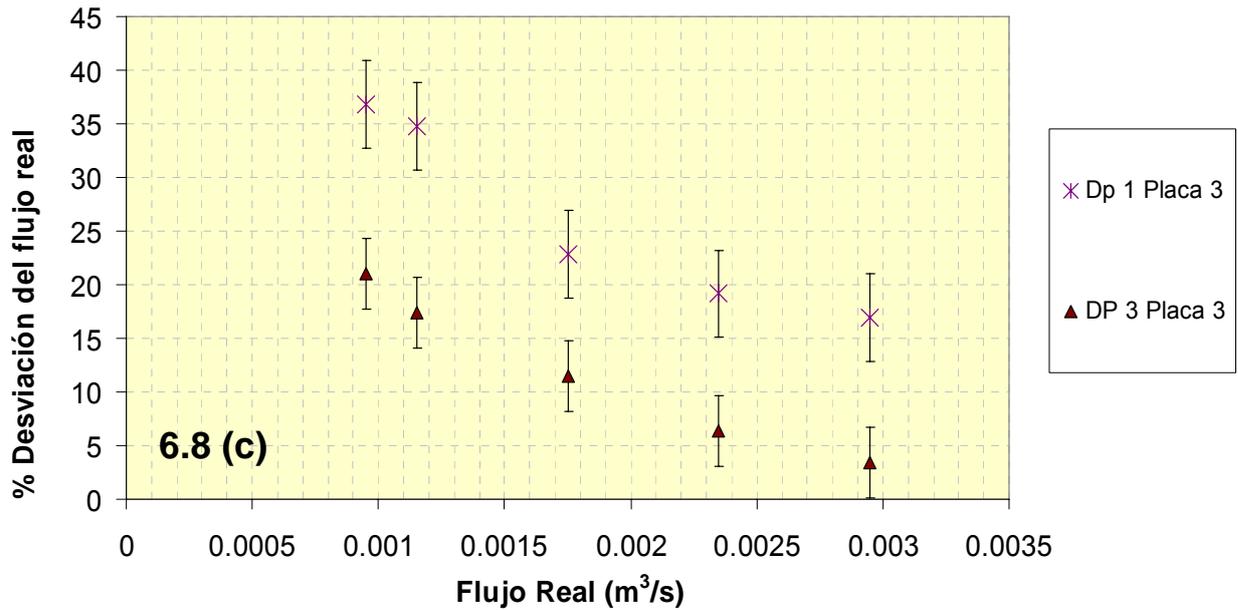


Figura 6.8 (c) Desviación del flujo real para la placa de 0.023 m de espesor sin ángulo a la descarga

En la figura 6.9 se muestra la sección de tomas de baja presión a 0.0285 m (0.5D) y 0.114 m (2D) después de la placa de orificio. Se le agregaron trazadores al flujo con el fin de observar las zonas de turbulencia producidas por la constricción. Se pueden observar regiones de recirculación, las cuales presentan gran energía cinética, tales regiones presentan variaciones de presión y velocidad afectando la medición de presión estática en las paredes del ducto, lo cual induce errores en la estimación de flujo con la placa de orificio.

También se puede observar que estas zonas de recirculación se encuentran presentes en los puntos que la norma [1] recomienda para la colocación de las tomas de baja presión. Por lo tanto, la norma [1] para minimizar estos errores utiliza el coeficiente de descarga. Sin embargo, este flujo medido con la placa de orificio, sigue siendo un flujo diferente al real.

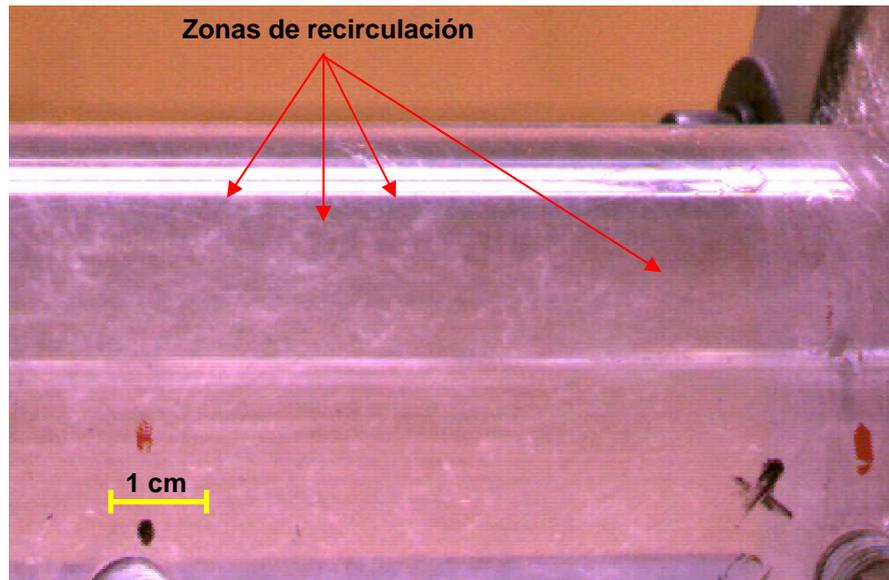


Figura 6.9 Sección de la tubería donde se ubican las tomas de baja presión

## 6.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES VS SIMULACIÓN NUMÉRICA

En esta sección se comparan los resultados de medición de flujo obtenidos experimentalmente contra los obtenidos mediante simulación numérica en 3D. para las placas 2, 3 y 4 indicadas en la tabla 6.1

En el capítulo 3 se demostró que la simulación numérica en 2D de flujos turbulentos presenta resultados menos precisos en comparación con los resultados obtenidos en 3D, por lo tanto, en esta sección se comparan los resultados de medición de flujo obtenidos experimentalmente y los resultados obtenidos de la simulación numérica en 3D.

Cabe recordar que el punto donde se realizó el cálculo de presión estática antes de la placa de orificio es a  $0.057\text{ m}$  ( $1D$ ) y el punto de cálculo de presión estática después de la placa se localiza a  $0.0285\text{ m}$  ( $0.5D$ ). Tales posiciones son recomendadas por la norma ISO 5167-2 [1]. También se calculó la presión al centro del espesor de la placa de  $0.023\text{ m}$ , la cual fue propuesta para este trabajo.

Se puede observar que el flujo calculado con la integración del perfil de velocidad media obtenido de la simulación numérica tiene una buena aproximación al valor del flujo real determinado experimentalmente, con lo cual se puede tomar este flujo calculado numéricamente como flujo real, con el fin de tener un flujo de referencia sin la necesidad de realizar mediciones experimentales.

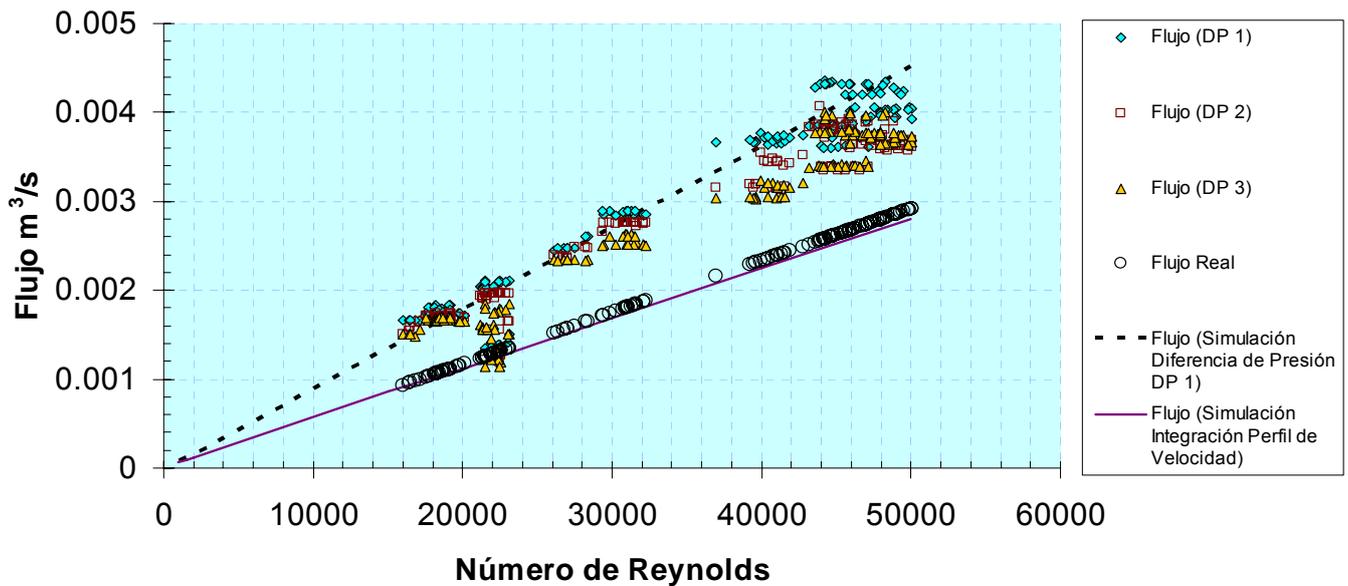


Figura 6.10. Medición de Flujo mediante Simulación Numérica y Experimentación

Se puede observar que los resultados de simulación numérica para la medición de flujo obtenidos mediante la  $\Delta P$  producida por la placa de orificio son muy aproximados a los resultados obtenidos experimentalmente, incluyendo la desviación existente contra el flujo real. Es decir, la simulación numérica está representando fielmente al flujo dentro de la tubería incluyendo el error en la medición inducido por la placa de orificio. El modelo numérico calcula todas las variaciones de presión y velocidad características del flujo turbulento, así como las zonas de recirculación producidas por la placa de orificio. Lo cual indica que el mallado espacial y el intervalo de tiempo elegidos para este trabajo son adecuados así como las condiciones de frontera establecidas para el modelo matemático.

El modelo elegido como el principal para el cálculo numérico es el  $k - \epsilon$ , el cual ha sido ampliamente utilizado para la simulación de flujos turbulentos con resultados muy aceptables reportados en la literatura [6,7]. En este trabajo los resultados numéricos calculados con este modelo presentan una muy buena aproximación a los resultados experimentales, como se puede observar en las figuras 6.10, 6.11 y 6.12. Además de que requiere tiempo y capacidad de cómputo menores.

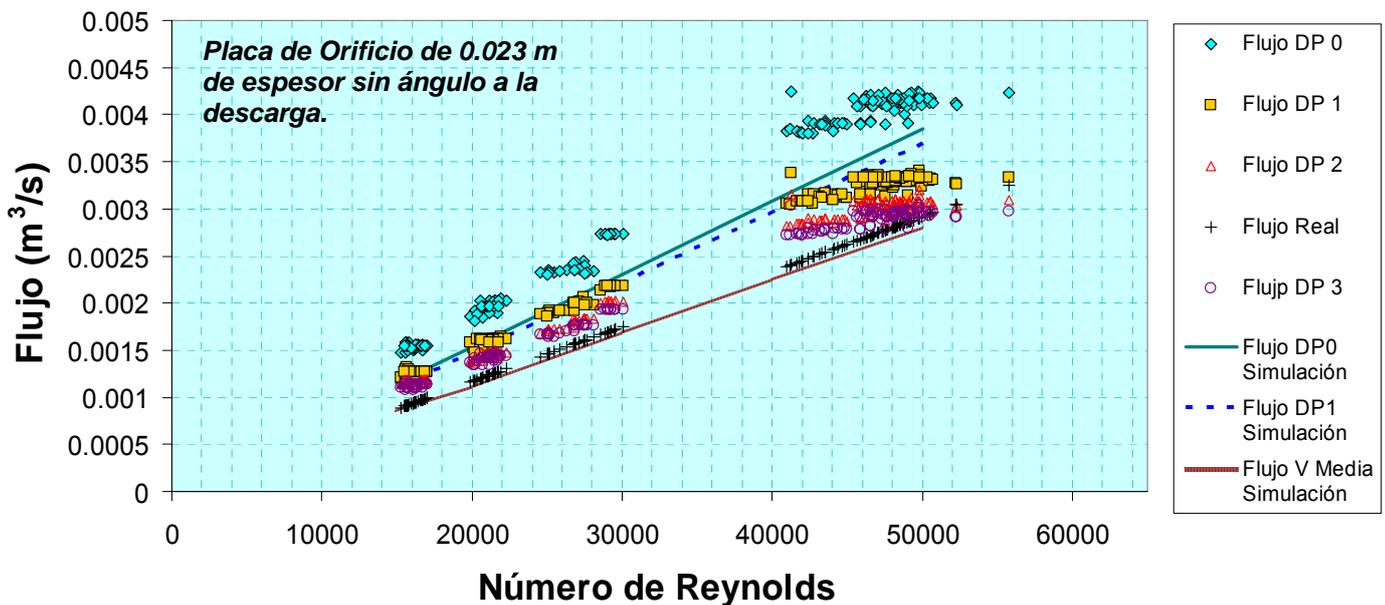


Figura 6.11 Medición de Flujo mediante Simulación Numérica y Experimentación

En la figura 6.11 y 6.12 se puede observar que el flujo calculado con la simulación numérica de  $\Delta P$  dentro de la placa de orificio ( $\Delta P 0$ ) presenta una menor desviación del flujo real en comparación de los resultados experimentales en la misma posición, lo cual se debe al incremento fuerte de momentum ocasionado por la reducción del área, lo cual dificulta la medición experimental de presión en ese punto.

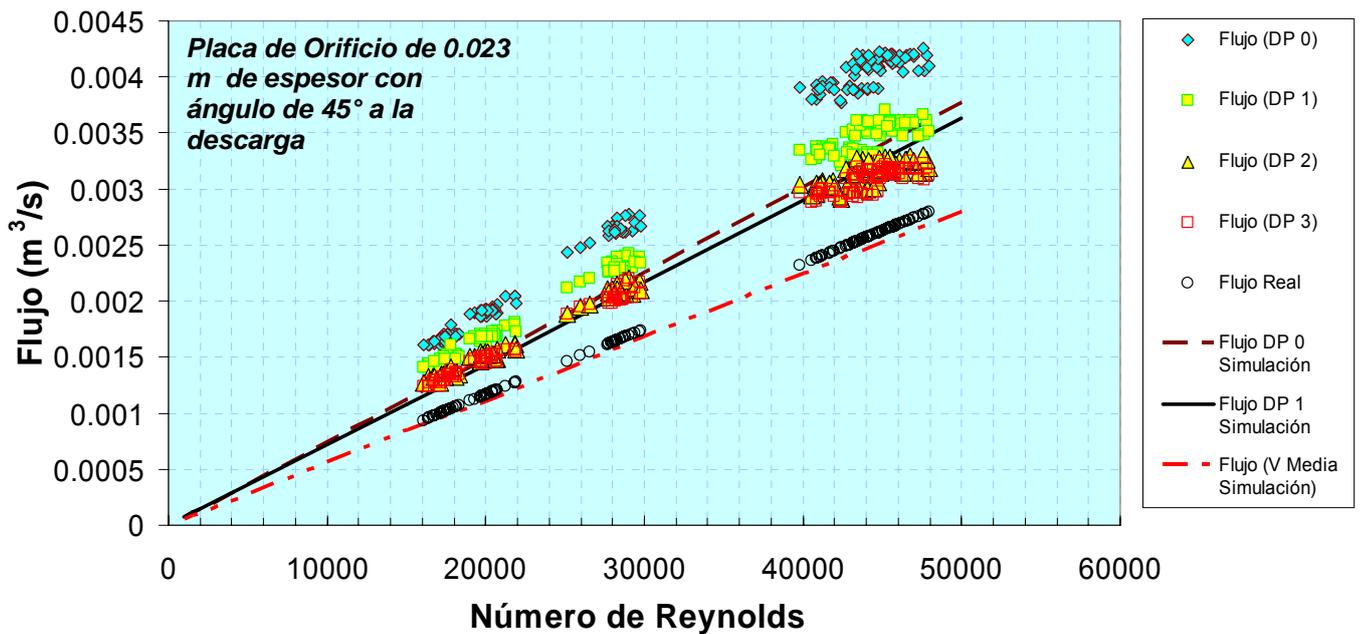


Figura 6.12 Medición de Flujo mediante Simulación Numérica y Experimentación

En las figuras 6.13 a, b y c se muestran los resultados de medición de flujo con las placas de orificio obtenidos experimentalmente y mediante simulación numérica, donde se puede observar que los resultados obtenidos numéricamente presentan una buena aproximación a los resultados obtenidos de la experimentación, lo cual indica que la simulación numérica se realizó correctamente y se está calculando adecuadamente las propiedades del flujo turbulento.

Al haber comprobado que la simulación se realizó correctamente, se pueden realizar otras simulaciones variando condiciones como velocidad de entrada, geometría de la placa y diferentes fluidos sin la necesidad de realizar experimentos en el modelo físico. También, se pueden determinar los factores de corrección para diferentes placas de orificio y evitar la necesidad de calibrar las placas de manera experimental.

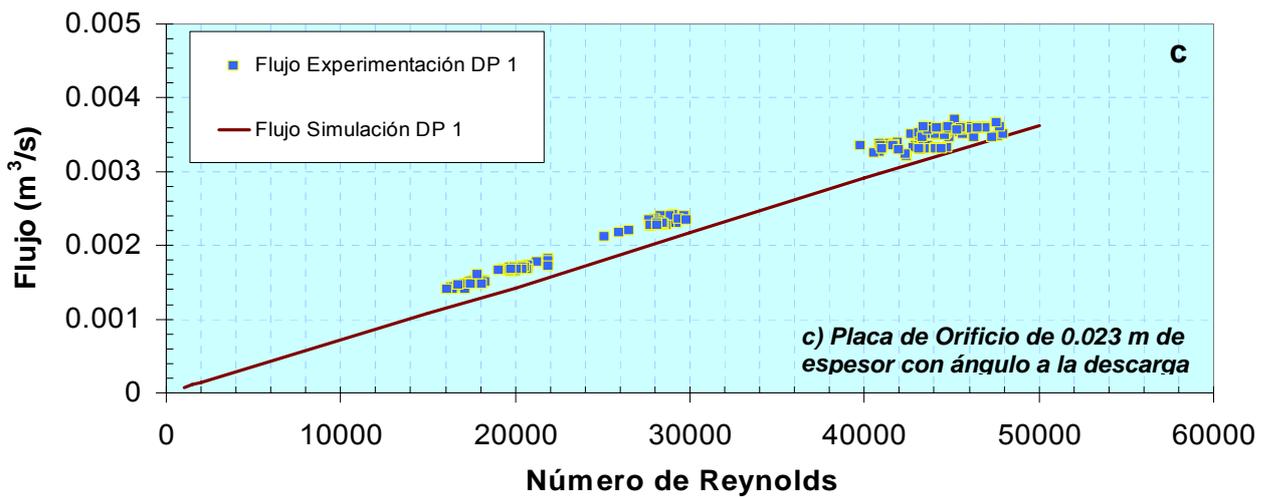
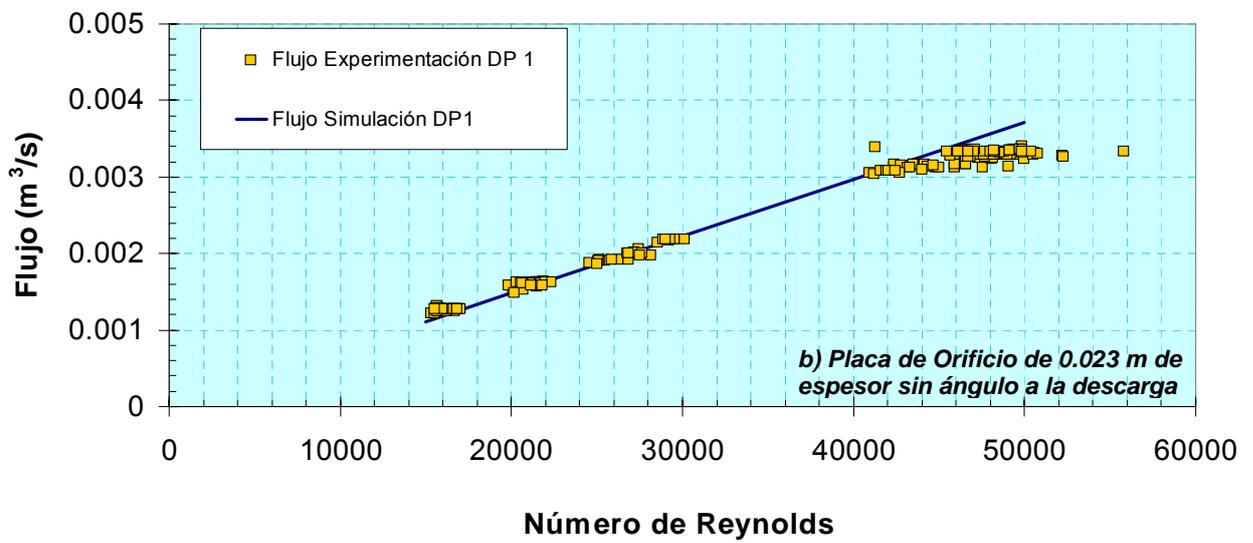
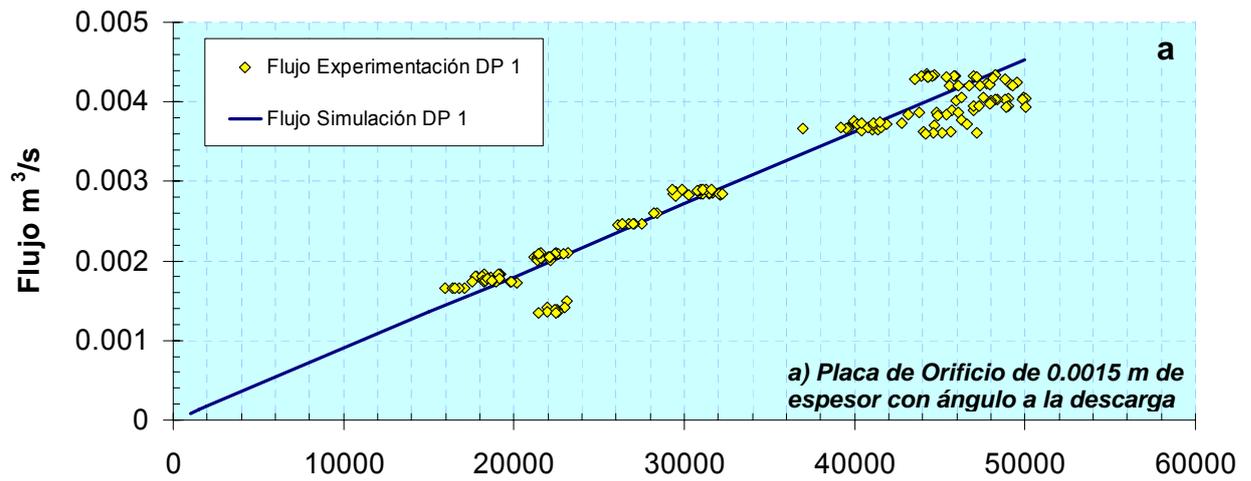


Figura 6.13 a, b, c Medición de Flujo mediante Simulación Numérica y experimentación con las diferentes placas de orificio en las tomas de presión 1.

En la literatura [8] se reportan datos obtenidos mediante DFC utilizando el modelo de turbulencia  $k - \varepsilon$ . Con el fin de determinar como afectan los diferentes factores geométricos al coeficiente de descarga para números de Reynolds desde 1 hasta 100,000. Los diferentes factores geométricos que se estudiaron fueron:

Relación de diámetros  $\beta$ , espesor de placa de orificio, diferentes figuras geométricas del orificio, geometría de la entrada al orificio y posición de las tomas de presión

El coeficiente de descarga fue calculado con la ecuación (8), la cual es equivalente a la ecuación (3) utilizada en este trabajo.

$$C_D = \frac{Q}{A \sqrt{2\Delta P / \rho}} \quad (8)$$

Donde:

$C_D$  = Coeficiente de descarga;  $Q$  = Flujo;  $A$  = Área del Orificio;  $\rho$  = Densidad;  $\Delta P$  = Diferencia de Presión

La diferencia de presión fue medida a 2.5D antes de la placa y 8D después de la placa, sin embargo, también se midió la presión estática en los lugares recomendados por la norma[1]. El fluido utilizado fue el Exxon B<sup>TM</sup> ( $\rho = 794.4 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 0.007872 \frac{Ns}{m^2}$ ).

Se utilizaron relaciones de diámetro de 0.04, 0.12 y 0.30 y los coeficientes de descarga obtenidos fueron 0.590, 0.595 y 0.630 respectivamente, para una placa “sin espesor”, cabe recordar que estos datos fueron obtenidos mediante simulación numérica, por lo que una placa “sin espesor” en la práctica no se puede hacer.

También se determinó que a mayores espesores de placa, el coeficiente de descarga aumenta. Se reportan datos del  $C_D$  de aproximadamente 0.72 para

flujos con números de Reynolds entre 5,000 y 100,000; utilizando placas de orificio de 0.0015 m de espesor, es decir, el mismo espesor a la placa 1 empleada en este trabajo, obteniéndose resultados muy similares a los obtenidos en este trabajo indicados en la tabla 6.2.

Por otro lado, se reportan datos para una placa con forma similar a la placa 2, utilizada en este trabajo, donde los valores del  $C_D$  son aproximadamente 0.68 para flujos con números de Reynolds entre 5,000 y 100,000. Estos datos presentan una gran similitud a los reportados en la tabla 6.2 de este trabajo.

Además, se reportan datos variando la posición de las tomas de presión, donde los  $C_D$  para la posición de tomas de presión recomendadas por la norma [1] presentan valores de 0.6 para flujos con números de Reynolds entre 5,000 y 100,000; los cuales son muy similares a los reportados en la tabla 6.2.

En base a lo anterior, se puede ver que los resultados obtenidos experimentalmente y con simulación numérica son congruentes con los datos reportados en la literatura [1,8]

Los factores de corrección obtenidos para la medición de flujo con las placas de orificio diseñadas para este trabajo fueron determinados calculando la desviación existente entre el flujo estimado con la diferencia de presión generada por la placa de orificio y el flujo real. Ambos flujos fueron determinados experimentalmente.

Para la medición de flujo con la placa de orificio diseñada bajo las especificaciones de la norma ISO 5167-2, los factores de corrección tienen una magnitud entre 50 y 60% para flujos con valores de Reynolds entre 16,000 y 50,000; cuando se midió la diferencia de presión con la toma de baja presión a 0.057 m (1D) antes de la placa y la toma de baja presión a 0.0285 m (0.5D) después de la placa. Para la medición de flujo utilizando la posición de tomas de presión a 0.171 m (3D) antes y después de la placa de orificio los factores de corrección tienen una magnitud entre 34 y 43%.

Por otro lado, el flujo medido con la placa de orificio de 0.023 m de espesor sin ángulo a la descarga se presentaron factores de corrección entre 16 y 37%

para la toma de alta presión a 0.057 m (1D) antes de la placa y la de baja presión a 0.0285 (0.5D) después de la placa de orificio. Cuando se midió el flujo utilizando las posiciones de las tomas de alta y baja presión a 0.171 m (3D) se presentaron factores de corrección entre 21 y 4%. Como se puede observar, la determinación del flujo con la placa de orificio de 0.023 m de espesor sin ángulo a la descarga con la posición de tomas de presión a 0.171 m (3D) antes y después de la placa requiere factores de corrección menores.

### 6.3. FACTORES DE CORRECCIÓN

En la tabla 6.3 se muestran los factores de corrección calculados para la medición de flujo con las placas de orificio diseñadas para este trabajo, mediante la medición de diferencia de presión con tomas localizadas en la posición indicada por la norma y la posición de tomas de presión más alejada de la placa propuesta para este trabajo (toma de alta y baja presión a 3D antes y después de la placa de orificio respectivamente)

Tabla 6.3 Factores de corrección para la medición de flujo con las placas diseñadas para este trabajo.

Placa de Orificio	Re	$\Delta P$ 1	$\Delta P$ 3
1	5000	-	-
	10000	-	-
	18000	0.67	0.38
	20000	0.61	0.39
	30000	0.58	0.36
	40000	0.43	0.26
	50000	0.38	0.22
2	5000	-	-
	10000	-	-
	16000	0.58	0.42
	20000	0.61	0.43
	30000	0.54	0.37
	40000	0.49	0.34
	50000	0.50	0.34
3	5000	-	-
	10000	-	-
	16000	0.37	0.21
	20000	0.35	0.17
	30000	0.23	0.11
	40000	0.19	0.06
	50000	0.17	0.03
4	5000	-	-
	10000	-	-
	16000	0.47	0.32
	20000	0.48	0.30
	30000	0.40	0.23
	40000	0.34	0.19
	48000	0.34	0.20

## 6.4 RESUMEN

Las tomas de presión 3 son las más apropiadas para la medición de  $\Delta P$ , es decir, las tomas de alta y baja presión se localizan a 0.171 m (3D) antes y después de la placa de orificio respectivamente.

Entre más cerca se encuentren las tomas de presión de la placa de orificio, la medición es más imprecisa. Por lo tanto, la posición 1 de las tomas de presión recomendadas por la norma ISO 5167-2 [1] no son adecuadas para la medición de  $\Delta P$ , las cuales son a 1D antes de la placa de orificio para la toma de alta presión y a 0.5D para la toma de baja presión.

La posición 2 corresponde a tomas en las bridas, las tomas de alta y baja presión se colocan a 0.0254 m antes y después de la placa respectivamente.

La norma también recomienda colocar tomas de presión inmediatamente antes y después de la placa de orificio. Sin embargo, se comprobó que esta posición al estar muy cerca de la placa traería una desviación mayor del flujo real.

En este trabajo se propone colocar la toma de baja presión a la mitad del espesor de la placa de orificio, sin embargo, el medir la  $\Delta P$  con estas tomas de presión, la diferencia con el flujo real se hizo mayor.

Se comprobó también que la medición de flujo con las placas de orificio de 0.023 m de espesor se aproximan más al flujo real en comparación con las placas de 0.0015 m de espesor, ya que al existir una longitud mayor a través de la cual se hace pasar el fluido, éste alcanza un mayor desarrollo y estabilidad de sus propiedades. Dentro de las cuales, las mediciones de flujo con las placas de orificio con ángulo a la descarga presentaron mayores desviaciones del flujo real.

Por lo tanto, experimentalmente, la medición de flujo con la placa de orificio de 0.023 m de espesor sin ángulo a la descarga presentó resultados más exactos.

Al comparar los resultados numéricos contra los resultados experimentales se puede observar que existe una gran aproximación entre ambos. Se puede ver que el modelo  $k - \varepsilon$  proporciona resultados aceptables para la simulación de flujos turbulentos, por lo tanto, se pueden realizar simulaciones numéricas variando otras condiciones sin necesidad de realizar mediciones experimentales adicionales. También se puede medir el flujo numéricamente utilizando fluidos con diferentes viscosidades, densidades, etc. Sin la necesidad de tener la instalación experimental.

Con el fin de mejorar la precisión de la medición de flujo de fluidos con dispositivos de presión diferencial, se requiere revisar y modificar la norma existente, tanto cambios en la geometría del sensor, como en la colocación de tomas de presión, así como longitudes de entrada a la placa.

## 6.5 REFERENCIAS

1. International Standard ISO 5167-2. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular-cross section conduits running full. Part 2. Orifice Plates. Switzerland 2003
2. Figliola, B., Mediciones Mecánicas - Teoría y Diseño 3ª Edición. Alfaomega. México D.F. 2003, pp 426 – 433
3. Arias, R., Incertidumbre en la medición de flujo másico mediante una Placa de Orificio, Centro Nacional de Metrología, México, Abril 2001.
4. Creuz, A., Instrumentación Industrial 7ª Edición. Alfaomega - Marcombo. México, D.F., Noviembre 2005, pp. 104 - 135
5. Urner, G. Pressure loss of orifice plates according to ISO 5167-1, Journal of Flow Measurement and Instrumentation., Vol 8, No. 1, pp 39 – 41, 1997

6. Hilgenstock A., Ernst R. Analysis of Installation Effects by Means of Computacional Fluid Dynamics. CFD vs Experiments?, Journal of Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 7 No. 3/4, Octubre 1996, pp. 161 – 171
  
7. Launder, B.E. and Spalding, D.B., The Numerical Computation of Turbulent Flows., Journal of Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 3, 1974. pp 269 - 289
  
8. Cheolwan K., Chin-Yuan P., Dengfu Z., Dongmin L., Orifice Flow Characteristics. Ford Technical Journal, Vol. 6, No. 3, May 2003

## CAPITULO 7. CONCLUSIONES

Se realizó el análisis numérico y experimental del flujo de fluidos a través de un sensor de medición de flujo tipo placa de orificio.

Este sensor, mediante la disminución de presión y aumento de velocidad generada por la reducción del área transversal al flujo, permite la estimación del flujo de fluidos. Para este estudio, se diseñaron placas de orificio bajo las especificaciones de la norma ISO 5167-2, así como placas de orificio construidas fuera de tales especificaciones para comprobar el efecto de tales variaciones geométricas en la determinación del flujo.

Mediante estos análisis se determinaron factores de corrección para la determinación del flujo con las placas de orificio diseñadas bajo especificaciones de la norma ISO 5167-2. Además, se determinaron diferentes condiciones geométricas que mejoraron la precisión de la medición de flujo con este tipo de sensor.

Por otro lado, con los datos obtenidos tanto con las simulaciones numéricas como experimentalmente se observó que generando la caída de presión con placas de orificio de espesores mayores a los recomendados por la norma ISO 5167-2 se obtienen mediciones más exactas. Así mismo, se comprobó que el ángulo a la descarga de la placa de orificio genera un mayor error en la determinación del flujo en comparación con las placas de orificio sin ángulo a la descarga

Dentro del análisis numérico, se comprobó que la simulación numérica en 3D presenta una mejor aproximación al valor del flujo real en comparación con las simulaciones en 2D.

Por otro lado, la simulación de flujo de fluidos en una tubería de sección circular el modelo  $k - \varepsilon$  proporciona una excelente aproximación con los datos obtenidos experimentalmente. Esto indica que las condiciones de frontera,

mallado espacial, intervalo de tiempo  $\Delta t$  utilizados son adecuados. Así mismo, el modelo  $k - \varepsilon$  requiere menos tiempo de cómputo a comparación de los modelos LES y RSM.

Por lo tanto, una vez validados los resultados numéricos con los datos experimentales, se puede confiar en que los datos obtenidos mediante la simulación numérica representan fielmente al fenómeno físico, por lo que estudios posteriores se pueden realizar únicamente utilizando simulación numérica sin la necesidad de la reconstrucción de equipo experimental.

Para el diseño y construcción de la instalación experimental utilizada en este trabajo, se utilizaron las especificaciones de la norma ISO 5167-2, además otras condiciones fuera de tales especificaciones que se describen a continuación:

Se realizó un análisis de capa límite para determinar la longitud de tubería recta necesaria para obtener un flujo totalmente desarrollado. Mediante este análisis se determinó que la longitud de tubería recta necesaria es 2 m. Este dato no concuerda con la longitud especificada por la norma, que recomienda que la longitud de entrada sea 0.741 m (13D). Se puede observar que la longitud recomendada por la norma no es suficiente para lograr que el flujo se desarrolle por completo.

También se determinó que las posiciones de las tomas de presión recomendadas por la norma ISO 5167-2 no son las más adecuadas para la medición de la diferencia de presión. Se comprobó que la estimación del flujo con la diferencia de presión generada por la placa de orificio presenta un error mayor cuanto más cerca están las tomas de presión de la placa de orificio.

Los factores de corrección obtenidos para la medición de flujo con las placas de orificio diseñadas para este trabajo fueron determinados calculando la desviación existente entre el flujo estimado con la diferencia de presión generada por la placa de orificio y el flujo real. Ambos flujos fueron determinados experimentalmente.

Para la medición de flujo con la placa de orificio diseñada bajo las especificaciones de la norma ISO 5167-2, los factores de corrección tienen una magnitud entre 50 y 60% para flujos con valores de Reynolds entre 16,000 y 50,000; cuando se midió la diferencia de presión con la toma de baja presión a 0.057 m (1D) antes de la placa y la toma de baja presión a 0.0285 m (0.5D) después de la placa. Para la medición de flujo utilizando la posición de tomas de presión a 0.171 m (3D) antes y después de la placa de orificio los factores de corrección tienen una magnitud entre 34 y 43%.

Por otro lado, el flujo medido con la placa de orificio de 0.023 m de espesor sin ángulo a la descarga se presentaron factores de corrección entre 16 y 37% para la toma de alta presión a 0.057 m (1D) antes de la placa y la de baja presión a 0.0285 (0.5D) después de la placa de orificio. Cuando se midió el flujo utilizando las posiciones de las tomas de alta y baja presión a 0.171 m (3D) se presentaron factores de corrección entre 21 y 4%. Como se puede observar, la determinación del flujo con la placa de orificio de 0.023 m de espesor sin ángulo a la descarga con la posición de tomas de presión a 0.171 m (3D) antes y después de la placa requiere factores de corrección menores.

La menor desviación del flujo medido con la placa de orificio del flujo real se presenta para flujos mayores.

En la literatura se reportan diferentes métodos para la determinación del coeficiente de descarga (CD), el cual representa la relación que existe entre el flujo determinado con la diferencia de presión y el flujo real; es una manera de aproximar el flujo medido con la placa de orificio al valor del flujo real. Sin embargo, el método para determinar este CD se restringe a las especificaciones de construcción e instalación de placas de orificio indicados en la norma.

Con el fin de mejorar la precisión de la medición de flujo de fluidos con dispositivos de presión diferencial, se requiere revisar y modificar la normatividad existente. Se requiere hacer cambios, tanto en la geometría de la

placa de orificio, como en la colocación de tomas de presión, así como longitudes de tubería recta a la entrada de la placa.

## TRABAJO A FUTURO

Mediante la simulación numérica se pueden y deben determinar factores de corrección para placas de orificio diseñadas bajo diferentes condiciones geométricas. Todo esto, variando geometrías, diámetros del orificio, ángulos de descarga y entrada, así como posición de tomas de presión. También hay que determinar factores de corrección para diferentes fluidos

También, se busca mejorar la eficiencia del cálculo numérico, reduciendo el tiempo de cómputo y trabajando con otros modelos de turbulencia. Con lo cual, se espera obtener un mayor número de factores de corrección para diferentes placas de orificio con el fin de mejorar la exactitud en la determinación del flujo con este tipo de sensores de flujo, sin la necesidad de calibrar tales sensores de manera experimental.

## APENDICE A

### DIAGRAMAS DE LAS PLACAS DE ORIFICIO DISEÑADAS PARA ESTE TRABAJO

Placa 2. Espesor de 0.0015 m con ángulo a la descarga.

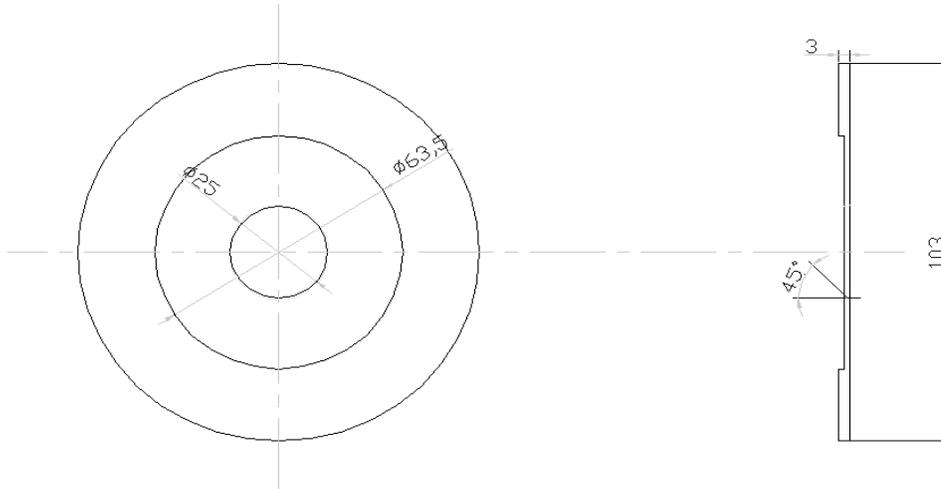


Figura A-1a. Placa de Orificio de 0.0015 m de espesor con ángulo de 45° a la descarga

Placa 3. Espesor de 0.023 m sin ángulo a la descarga.

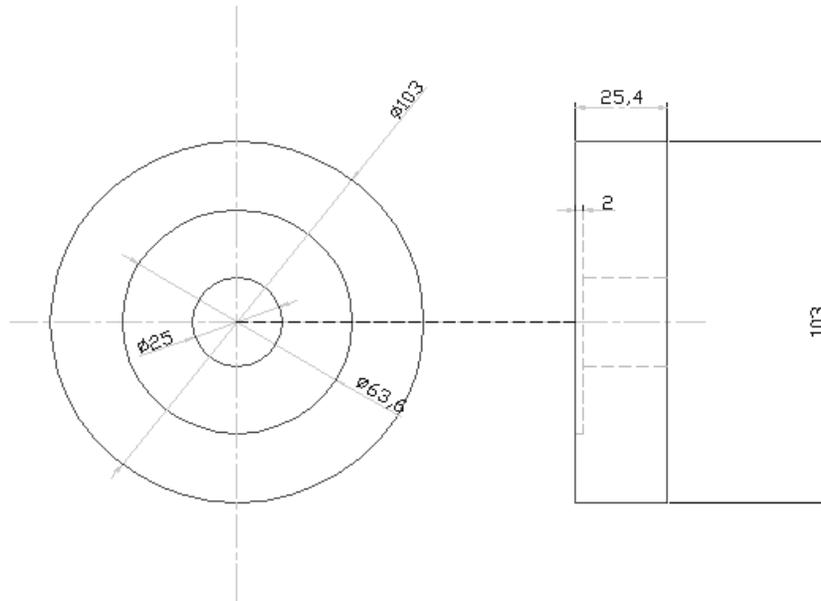


Figura A-1b. Placa de Orificio de 0.023 m de espesor sin ángulo a la descarga

Placa 4. Espesor de 0.023 m con ángulo a la descarga.

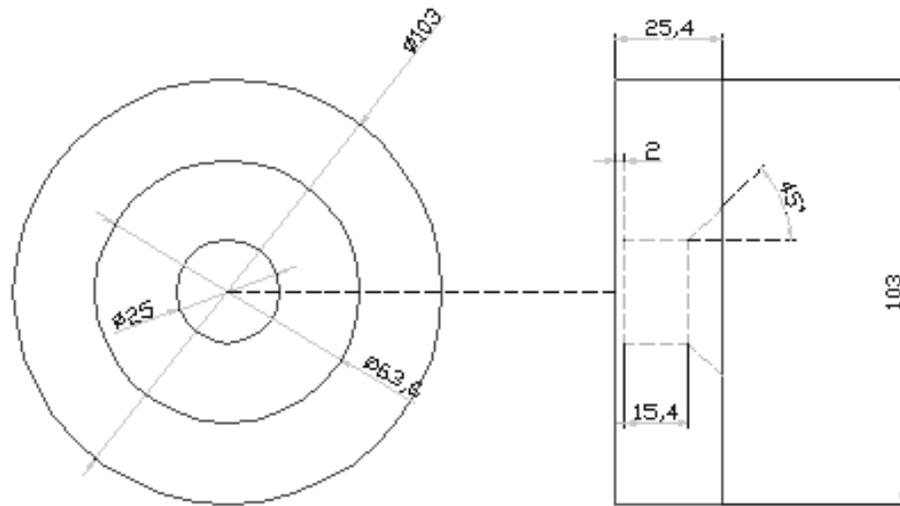


Figura A-1c. Placa de Orificio de 0.023 m de espesor con ángulo de 45° a la descarga

## APENDICE B

### DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE DESCARGA TABULADOS EN LA NORMA ISO 5167-2

Tabla B.1. Coeficientes de descarga para diámetro de tubería  $D = 50$  mm, con tomas de presión en las bridas

Diameter ratio $\beta$	Discharge coefficient, $C$ , for $Re_D$ equal to											
	$5 \times 10^3$	$1 \times 10^4$	$2 \times 10^4$	$3 \times 10^4$	$5 \times 10^4$	$7 \times 10^4$	$1 \times 10^5$	$3 \times 10^5$	$1 \times 10^6$	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^8$	$\infty$
0,25	0,610 2	0,606 9	0,604 8	0,604 0	0,603 2	0,602 9	0,602 5	0,601 9	0,601 6	0,601 4	0,601 3	0,601 2
0,26	0,610 6	0,607 1	0,605 0	0,604 1	0,603 3	0,602 9	0,602 6	0,602 0	0,601 6	0,601 4	0,601 3	0,601 2
0,28	0,611 4	0,607 6	0,605 3	0,604 4	0,603 5	0,603 1	0,602 8	0,602 1	0,601 7	0,601 4	0,601 3	0,601 2
0,30	0,612 3	0,608 2	0,605 7	0,604 7	0,603 8	0,603 4	0,603 0	0,602 2	0,601 8	0,601 5	0,601 4	0,601 3
0,32	0,613 2	0,608 9	0,606 2	0,605 2	0,604 2	0,603 7	0,603 2	0,602 4	0,601 9	0,601 6	0,601 4	0,601 3
0,34	0,614 3	0,609 7	0,606 8	0,605 6	0,604 5	0,604 0	0,603 5	0,602 6	0,602 1	0,601 7	0,601 6	0,601 4
0,36	0,615 5	0,610 5	0,607 4	0,606 2	0,605 0	0,604 4	0,603 9	0,602 9	0,602 3	0,601 9	0,601 7	0,601 6
0,38	0,616 9	0,611 5	0,608 1	0,606 8	0,605 5	0,604 9	0,604 3	0,603 2	0,602 6	0,602 1	0,601 9	0,601 7
0,40	0,618 4	0,612 5	0,608 9	0,607 5	0,606 1	0,605 4	0,604 8	0,603 6	0,602 9	0,602 3	0,602 1	0,601 9
0,42	0,620 0	0,613 7	0,609 8	0,608 2	0,606 8	0,606 0	0,605 4	0,604 1	0,603 3	0,602 6	0,602 3	0,602 1
0,44	0,621 9	0,615 0	0,610 8	0,609 1	0,607 5	0,606 7	0,606 0	0,604 5	0,603 7	0,602 9	0,602 6	0,602 3
0,46	0,623 9	0,616 4	0,611 9	0,610 0	0,608 3	0,607 4	0,606 7	0,605 1	0,604 1	0,603 3	0,602 9	0,602 6
0,48	0,626 0	0,618 0	0,613 0	0,611 0	0,609 2	0,608 2	0,607 4	0,605 7	0,604 6	0,603 6	0,603 2	0,602 8
0,50	0,628 4	0,619 6	0,614 3	0,612 1	0,610 1	0,609 1	0,608 2	0,606 3	0,605 1	0,604 0	0,603 6	0,603 1
0,51	0,629 7	0,620 5	0,614 9	0,612 7	0,610 6	0,609 5	0,608 6	0,606 6	0,605 4	0,604 2	0,603 7	0,603 3
0,52	0,631 0	0,621 4	0,615 6	0,613 3	0,611 1	0,610 0	0,609 0	0,606 9	0,605 6	0,604 4	0,603 9	0,603 4
0,53	0,632 4	0,622 4	0,616 3	0,613 9	0,611 6	0,610 5	0,609 4	0,607 3	0,605 9	0,604 6	0,604 1	0,603 5
0,54	0,633 8	0,623 4	0,617 1	0,614 5	0,612 2	0,610 9	0,609 9	0,607 6	0,606 2	0,604 8	0,604 2	0,603 7
0,55	0,635 2	0,624 4	0,617 8	0,615 2	0,612 7	0,611 4	0,610 3	0,608 0	0,606 5	0,605 0	0,604 4	0,603 8
0,56	0,636 7	0,625 4	0,618 6	0,615 9	0,613 3	0,611 9	0,610 8	0,608 3	0,606 7	0,605 2	0,604 5	0,603 9
0,57	0,638 3	0,626 5	0,619 4	0,616 5	0,613 8	0,612 4	0,611 2	0,608 7	0,607 0	0,605 4	0,604 7	0,604 0
0,58	0,639 9	0,627 6	0,620 2	0,617 2	0,614 4	0,613 0	0,611 7	0,609 0	0,607 3	0,605 6	0,604 8	0,604 1
0,59	0,641 6	0,628 7	0,621 0	0,617 9	0,615 0	0,613 5	0,612 2	0,609 3	0,607 5	0,605 8	0,605 0	0,604 2
0,60	0,643 3	0,629 9	0,621 8	0,618 6	0,615 5	0,614 0	0,612 6	0,609 7	0,607 8	0,605 9	0,605 1	0,604 3
0,61	0,645 0	0,631 0	0,622 7	0,619 3	0,616 1	0,614 5	0,613 1	0,610 0	0,608 0	0,606 0	0,605 1	0,604 3
0,62	0,646 8	0,632 2	0,623 5	0,620 0	0,616 7	0,615 0	0,613 5	0,610 3	0,608 2	0,606 2	0,605 2	0,604 3
0,63	0,648 6	0,633 4	0,624 3	0,620 7	0,617 3	0,615 5	0,613 9	0,610 6	0,608 4	0,606 2	0,605 3	0,604 3
0,64	0,650 5	0,634 7	0,625 2	0,621 4	0,617 8	0,616 0	0,614 4	0,610 9	0,608 6	0,606 3	0,605 3	0,604 3
0,65	0,652 4	0,635 9	0,626 0	0,622 1	0,618 4	0,616 4	0,614 8	0,611 1	0,608 8	0,606 4	0,605 3	0,604 2
0,66	0,654 4	0,637 1	0,626 9	0,622 8	0,618 9	0,616 9	0,615 2	0,611 4	0,608 9	0,606 4	0,605 2	0,604 1
0,67	0,656 4	0,638 4	0,627 7	0,623 4	0,619 4	0,617 3	0,615 5	0,611 6	0,609 0	0,606 3	0,605 1	0,603 9
0,68	0,658 4	0,639 6	0,628 5	0,624 1	0,619 9	0,617 7	0,615 8	0,611 7	0,609 0	0,606 2	0,605 0	0,603 7
0,69	0,660 4	0,640 9	0,629 3	0,624 7	0,620 4	0,618 1	0,616 1	0,611 9	0,609 0	0,606 1	0,604 8	0,603 5
0,70	0,662 5	0,642 1	0,630 1	0,625 3	0,620 8	0,618 5	0,616 4	0,612 0	0,609 0	0,606 0	0,604 5	0,603 2
0,71	0,664 6	0,643 4	0,630 9	0,625 9	0,621 2	0,618 8	0,616 6	0,612 0	0,608 9	0,605 7	0,604 3	0,602 8
0,72	0,666 7	0,644 6	0,631 6	0,626 5	0,621 6	0,619 0	0,616 8	0,612 0	0,608 8	0,605 5	0,603 9	0,602 4
0,73	0,668 9	0,645 9	0,632 3	0,627 0	0,621 9	0,619 3	0,617 0	0,612 0	0,608 6	0,605 1	0,603 5	0,601 9
0,74	0,671 0	0,647 1	0,633 0	0,627 5	0,622 2	0,619 5	0,617 1	0,611 9	0,608 4	0,604 7	0,603 0	0,601 4
0,75	0,673 2	0,648 3	0,633 7	0,627 9	0,622 4	0,619 6	0,617 1	0,611 7	0,608 1	0,604 3	0,602 5	0,600 8

NOTE This table is given for convenience. The values given are not intended for precise interpolation. Extrapolation is not permitted.

## APENDICE C

### RESULTADOS EXPERIMENTALES

Tabla C.1 Resultados experimentales obtenidos con la placa de orificio 1

	Posición de la válvula	$\Delta P$ (mmHg)	$\Delta P$ (Pa)	$\Delta P$ (mmHg)	$\Delta P$ (Pa)	$\Delta P$ (mmHg)	$\Delta P$ (Pa)	Volumen (l)	Tiempo (s)	Flujo Real (m <sup>3</sup> /s)	Vel (m/s)	Re	Flujo $\Delta P1$ (m <sup>3</sup> /s)	Flujo $\Delta P2$ (m <sup>3</sup> /s)	Flujo $\Delta P3$ (m <sup>3</sup> /s)	CD 1	CD 2	CD 3
1	5/6 vuelta	39	5196.7	33	4396.9	28	3732.4	19	18.44	0.0010	0.4036	17669.1288	0.0016	0.0015	0.0013	0.6503	0.7070	0.7675
2	5/6 vuelta	39	5196.7	34	4532.2	26	3465.8	19	19.11	0.0010	0.3996	17049.6460	0.0016	0.0015	0.0013	0.6275	0.6721	0.7686
3	5/6 vuelta	39	5196.7	34	4532.2	27	3599.1	19	19.07	0.0010	0.3904	17085.4082	0.0016	0.0015	0.0013	0.6288	0.6735	0.7558
4	5/6 vuelta	36	4796.8	30	3999	25	3332.5	19	19.8	0.0010	0.3761	16455.4917	0.0015	0.0014	0.0013	0.6304	0.6905	0.7566
5	5/6 vuelta	39	5196.7	33	4396.9	28	3732.4	19	19	0.0010	0.3919	17148.3545	0.0016	0.0015	0.0013	0.6312	0.6861	0.7449
6	5/6 vuelta	39	5196.7	34	4532.2	29	3865.7	19	19.89	0.0010	0.3744	16381.0324	0.0016	0.0015	0.0014	0.6029	0.6457	0.6992
7	5/6 vuelta	38	5065.4	33	4396.9	28	3732.4	19	19.61	0.0010	0.3797	16614.9278	0.0016	0.0015	0.0013	0.6196	0.6648	0.7217
8	5/6 vuelta	38	5065.4	33	4396.9	28	3732.4	19	19.99	0.0010	0.3725	16299.0863	0.0016	0.0015	0.0013	0.6077	0.6522	0.7080
9	5/6 vuelta	38	5065.4	33	4396.9	28	3732.4	19	19.62	0.0010	0.3795	16806.4595	0.0016	0.0015	0.0013	0.6192	0.6645	0.7213
1	5/6 vuelta	45	5998.5	39	5198.7	34	4532.2	19	17.42	0.0011	0.4274	18703.7161	0.0017	0.0016	0.0015	0.6409	0.6884	0.7373
2	5/6 vuelta	43	5731.9	38	5065.4	34	4532.2	19	17.87	0.0011	0.4167	18232.7216	0.0017	0.0016	0.0015	0.6391	0.6798	0.7187
3	5/6 vuelta	43	5731.9	39	5198.7	35	4685.5	19	18.18	0.0010	0.4096	17921.8226	0.0017	0.0016	0.0015	0.6282	0.6896	0.6963
4	5/6 vuelta	44	5885.2	38	5065.4	35	4685.5	19	18.67	0.0010	0.3988	17451.4587	0.0017	0.0016	0.0015	0.6047	0.6607	0.6780
5	5/6 vuelta	43	5731.9	36	4798.8	32	4285.6	19	18.62	0.0010	0.3999	17498.3209	0.0017	0.0015	0.0014	0.6133	0.6703	0.7110
6	5/6 vuelta	43	5731.9	37	4932.1	33	4398.9	19	18.68	0.0010	0.3986	17442.1164	0.0017	0.0015	0.0015	0.6114	0.6591	0.6979
7	5/6 vuelta	43	5731.9	37	4932.1	33	4398.9	19	18.56	0.0010	0.4012	17554.8887	0.0017	0.0015	0.0015	0.6153	0.6633	0.7024
8	5/6 vuelta	44	5885.2	36	4798.8	34	4532.2	19	18.15	0.0010	0.4102	17951.4454	0.0017	0.0015	0.0015	0.6220	0.6877	0.7076
9	5/6 vuelta	45	5998.5	37	4932.1	35	4685.5	19	18.03	0.0011	0.4130	18070.9226	0.0017	0.0015	0.0015	0.6192	0.6828	0.7021
1	5/6 vuelta	45	5998.5	40	5332	38	5065.4	19	17.08	0.0011	0.4359	19076.0383	0.0017	0.0016	0.0016	0.6536	0.6933	0.7113
2	5/6 vuelta	44	5885.2	39	5198.7	35	4685.5	19	17.93	0.0011	0.4153	18171.7086	0.0017	0.0016	0.0015	0.6297	0.6688	0.7050
3	5/6 vuelta	42	5598.6	36	4798.8	31	4132.3	19	19.06	0.0010	0.3907	17094.3722	0.0016	0.0015	0.0014	0.6063	0.6549	0.7057
4	5/6 vuelta	58	7731.4	32	4285.6	28	3732.4	19	20.01	0.0009	0.3721	16282.7953	0.0019	0.0014	0.0013	0.4914	0.6616	0.7073
5	5/6 vuelta	44	5885.2	38	5065.4	35	4685.5	19	18.74	0.0010	0.3973	17386.2719	0.0017	0.0016	0.0015	0.6025	0.6483	0.6755
6	5/6 vuelta	44	5885.2	35	4685.5	32	4285.6	19	18.44	0.0010	0.4038	17669.1288	0.0017	0.0015	0.0014	0.6123	0.6865	0.7179
7	5/6 vuelta	42	5598.6	37	4932.1	31	4132.3	19	18.8	0.0010	0.3961	17330.7838	0.0016	0.0015	0.0014	0.6147	0.6549	0.7155
8	5/6 vuelta	41	5485.3	34	4532.2	29	3865.7	19	19.85	0.0010	0.3751	16414.0421	0.0016	0.0015	0.0014	0.5892	0.6470	0.7006
9	5/6 vuelta	45	5998.5	40	5332	38	5065.4	19	17.88	0.0011	0.4164	18222.5243	0.0017	0.0016	0.0016	0.6244	0.6622	0.6796
1	1 vuelta	58	7731.4	55	7331.5	50	6665	19	13.3	0.0014	0.5596	24497.6492	0.0019	0.0019	0.0018	0.7394	0.7593	0.7963
2	1 vuelta	58	7731.4	53	7064.9	50	6665	19	14.3	0.0013	0.5207	22704.5269	0.0019	0.0018	0.0016	0.6877	0.7194	0.7406
3	1 vuelta	58	7731.4	53	7064.9	48	6398.4	19	14.55	0.0013	0.5117	22393.0402	0.0019	0.0018	0.0018	0.6756	0.7070	0.7429
4	1 vuelta	59	7864.7	51	6798.3	48	6398.4	19	12.99	0.0015	0.5732	25002.2737	0.0019	0.0018	0.0018	0.7506	0.8073	0.8321
5	1 vuelta	57	7598.1	52	6931.6	48	6398.4	19	14.3	0.0013	0.5207	22704.5269	0.0019	0.0018	0.0016	0.6937	0.7262	0.7559
6	1 vuelta	58	7731.4	53	7064.9	48	6398.4	19	14.35	0.0013	0.5189	22705.1383	0.0019	0.0018	0.0018	0.6853	0.7169	0.7533
7	1 vuelta	58	7731.4	52	6931.6	48	6398.4	19	14.1	0.0013	0.5281	23107.7117	0.0019	0.0018	0.0018	0.6974	0.7365	0.7666
8	1 vuelta	57	7598.1	51	6798.3	48	6398.4	19	13.56	0.0014	0.5491	24027.9303	0.0019	0.0018	0.0016	0.7315	0.7733	0.7971
9	1 vuelta	58	7731.4	51	6798.3	49	6531.7	19	14.02	0.0014	0.5311	23239.5674	0.0019	0.0018	0.0018	0.7014	0.7460	0.7631
1	1 vuelta	55	7331.5	50	6665	45	5998.5	19	15.11	0.0013	0.4928	21563.1194	0.0019	0.0018	0.0017	0.6683	0.7009	0.7388
2	1 vuelta	55	7331.5	50	6665	45	5998.5	19	16.05	0.0012	0.4639	20300.2327	0.0019	0.0018	0.0017	0.6292	0.6599	0.6966
3	1 vuelta	60	7998	55	7331.5	50	6665	19	15.17	0.0013	0.4908	21477.8335	0.0020	0.0019	0.0018	0.6373	0.6657	0.6981
4	1 vuelta	60	7998	56	7464.8	49	6531.7	19	15.32	0.0012	0.4860	21267.5414	0.0020	0.0019	0.0018	0.6311	0.6532	0.6983
5	1 vuelta	61	8131.3	56	7464.8	50	6665	19	14.75	0.0013	0.5048	22089.4057	0.0020	0.0019	0.0018	0.6501	0.6785	0.7180
6	1 vuelta	58	7731.4	47	6285.1	42	5598.6	19	18.24	0.0010	0.4882	17862.8692	0.0019	0.0017	0.0016	0.5391	0.5989	0.6336
7	1 vuelta	40	5332	37	4932.1	30	3999	19	18.05	0.0011	0.4125	18050.8994	0.0016	0.0015	0.0014	0.6560	0.6821	0.7575
8	1 vuelta	40	5332	36	4798.8	29	3865.7	19	18.19	0.0010	0.4093	17911.9700	0.0016	0.0015	0.0014	0.6510	0.6862	0.7645
9	1 vuelta	40	5332	36	4798.8	29	3865.7	19	18.23	0.0010	0.4084	17872.6678	0.0016	0.0015	0.0014	0.6495	0.6847	0.7628
1	1 vuelta	65	8684.5	58	7731.4	50	6665	19	15.08	0.0013	0.4944	21634.7101	0.0020	0.0019	0.0018	0.6188	0.6530	0.7032
2	1 vuelta	48	6398.4	40	5332	38	5065.4	19	16.89	0.0011	0.4461	19521.7936	0.0018	0.0016	0.0016	0.6477	0.7095	0.7279
3	1 vuelta	47	6285.1	41	5485.3	37	4932.1	19	17.63	0.0011	0.4223	18480.9285	0.0017	0.0016	0.0015	0.6195	0.6634	0.6983
4	1 vuelta	49	6531.7	42	5598.6	36	4798.8	19	17.06	0.0011	0.4365	19098.4018	0.0018	0.0016	0.0015	0.6271	0.6774	0.7316
5	1 vuelta	48	6398.4	40	5332	36	4798.8	19	18.56	0.0010	0.4012	17554.8887	0.0018	0.0016	0.0015	0.5824	0.6380	0.6725
6	1 vuelta	46	6131.8	38	5065.4	36	4798.8	19	18.3	0.0010	0.4069	17804.3024	0.0017	0.0016	0.0015	0.6034	0.6639	0.6821
7	1 vuelta	47	6285.1	39	5198.7	35	4685.5	19	18.93	0.0010	0.3933	17211.7662	0.0017	0.0016	0.0015	0.5771	0.6335	0.6687
8	1 vuelta	48	6398.4	39	5198.7	36	4798.8	19	18.87	0.0010	0.3946	17266.4936	0.0018	0.0016	0.0015	0.5728	0.6355	0.6814
9	1 vuelta	49	6531.7	39	5198.7	35	4685.5	19	18.06	0.0011	0.4123	18040.9045	0.0018	0.0016	0.0015	0.5924	0.6640	0.7009

1	1 1/3 vuelta	86	11463.0	55	7331.5	50	6665	19	13.3	0.0014	0.5598	24497.6492	0.0024	0.0019	0.0018	0.6072	0.7593	0.7963
2	1 1/3 vuelta	85	11330.5	53	7064.9	50	6665	19	14.3	0.0013	0.5207	22784.5269	0.0023	0.0018	0.0018	0.5680	0.7194	0.7406
3	1 1/3 vuelta	85	11330.5	53	7064.9	48	6398.4	19	14.55	0.0013	0.5117	22393.0402	0.0023	0.0018	0.0018	0.5583	0.7070	0.7429
4	1 1/3 vuelta	85	11330.5	51	6798.3	48	6398.4	19	12.99	0.0015	0.6732	26082.2737	0.0023	0.0018	0.0018	0.6253	0.8073	0.8321
5	1 1/3 vuelta	82	10930.6	52	6931.6	48	6398.4	19	14.3	0.0013	0.5207	22784.5269	0.0023	0.0018	0.0018	0.5783	0.7262	0.7659
6	1 1/3 vuelta	80	10664	53	7064.9	48	6398.4	19	14.35	0.0013	0.5189	22705.1383	0.0023	0.0018	0.0018	0.5835	0.7169	0.7533
7	1 1/3 vuelta	83	11063.9	52	6931.6	48	6398.4	19	14.1	0.0013	0.5281	23107.7117	0.0023	0.0018	0.0018	0.5630	0.7365	0.7666
8	1 1/3 vuelta	84	11197.2	51	6798.3	48	6398.4	19	13.56	0.0014	0.5491	24027.9303	0.0023	0.0018	0.0018	0.6026	0.7733	0.7971
9	1 1/3 vuelta	85	11330.5	51	6798.3	49	6531.7	19	14.02	0.0014	0.5311	23239.5674	0.0023	0.0018	0.0018	0.5794	0.7480	0.7631
1	1 1/3 vuelta	95	12663.5	83	11063.9	75	9997.5	19	12.51	0.0015	0.5952	26044.6631	0.0025	0.0023	0.0022	0.6142	0.6571	0.6912
2	1 1/3 vuelta	96	12796.8	84	11197.2	74	9864.2	19	12.58	0.0015	0.5919	25899.7404	0.0025	0.0023	0.0022	0.6076	0.6496	0.6920
3	1 1/3 vuelta	90	11997	80	10664	70	9331	19	12.37	0.0015	0.6019	26339.4288	0.0024	0.0023	0.0021	0.6382	0.6769	0.7236
4	1 1/3 vuelta	85	11330.5	75	9997.5	70	9331	19	12.97	0.0015	0.5741	25120.9510	0.0023	0.0022	0.0021	0.6263	0.6667	0.6901
5	1 1/3 vuelta	85	11330.5	76	10130.8	68	9064.4	19	12.32	0.0015	0.6044	26446.3259	0.0023	0.0022	0.0021	0.6593	0.6973	0.7371
6	1 1/3 vuelta	86	11463.0	77	10264.1	69	9197.7	19	12.55	0.0015	0.5933	25961.6522	0.0024	0.0022	0.0021	0.6435	0.6900	0.7184
7	1 1/3 vuelta	80	10664	76	10130.8	65	8664.5	19	12.25	0.0016	0.6078	26597.4477	0.0023	0.0022	0.0020	0.6835	0.7013	0.7583
8	1 1/3 vuelta	80	10664	76	10130.8	65	8664.5	19	12.01	0.0016	0.6200	27128.9538	0.0023	0.0022	0.0020	0.6972	0.7153	0.7734
9	1 1/3 vuelta	80	10664	77	10264.1	66	8797.8	19	12.74	0.0015	0.5844	25574.4690	0.0023	0.0022	0.0021	0.6572	0.6899	0.7236
1	1 1/3 vuelta	75	9997.5	65	8664.5	60	7998	19	13.17	0.0014	0.5654	24739.4635	0.0022	0.0020	0.0020	0.6566	0.7053	0.7341
2	1 1/3 vuelta	74	9864.2	65	8664.5	60	7998	19	12.91	0.0015	0.5768	25237.7022	0.0022	0.0020	0.0020	0.6743	0.7195	0.7489
3	1 1/3 vuelta	75	9997.5	65	8664.5	60	7998	19	13.31	0.0014	0.5594	24479.2438	0.0022	0.0020	0.0020	0.6497	0.6979	0.7264
4	1 1/3 vuelta	74	9864.2	64	8531.2	59	7864.7	19	12.98	0.0015	0.5736	25101.5974	0.0022	0.0020	0.0019	0.6707	0.7212	0.7511
5	1 1/3 vuelta	74	9864.2	65	8664.5	59	7864.7	19	12.86	0.0015	0.5790	25335.8270	0.0022	0.0020	0.0019	0.6770	0.7223	0.7581
6	1 1/3 vuelta	75	9997.5	65	8664.5	60	7998	19	13.05	0.0015	0.5706	24966.9529	0.0022	0.0020	0.0020	0.6626	0.7118	0.7409
7	1 1/3 vuelta	75	9997.5	64	8531.2	60	7998	19	12.56	0.0015	0.5928	26940.9821	0.0022	0.0020	0.0020	0.6885	0.7453	0.7698
8	1 1/3 vuelta	75	9997.5	65	8664.5	60	7998	19	13.23	0.0014	0.5628	24627.2664	0.0022	0.0020	0.0020	0.6536	0.7021	0.7308
9	1 1/3 vuelta	75	9997.5	65	8664.5	58	7731.4	19	13.56	0.0014	0.5491	24027.9303	0.0022	0.0020	0.0019	0.6377	0.6850	0.7252
1	2 vueltas	178	23727.4	160	21328	125	16662.5	19	7.97	0.0024	0.9342	40880.6443	0.0034	0.0032	0.0028	0.7043	0.7428	0.8404
2	2 vueltas	173	23060.9	160	21328	123	16395.9	19	7.94	0.0024	0.9378	41035.1051	0.0033	0.0032	0.0028	0.7171	0.7457	0.8504
3	2 vueltas	173	23060.9	158	21061.4	120	15996	19	7.93	0.0024	0.9389	41086.8518	0.0033	0.0032	0.0028	0.7180	0.7513	0.8621
4	2 vueltas	167	22261.1	155	20661.5	115	15329.5	19	8.04	0.0024	0.9261	40524.7183	0.0033	0.0032	0.0027	0.7208	0.7482	0.8686
5	2 vueltas	166	22127.8	153	20394.9	115	15329.5	19	8.3	0.0023	0.8971	39255.2693	0.0033	0.0031	0.0027	0.7003	0.7294	0.8414
6	2 vueltas	168	22394.4	153	20394.9	115	15329.5	19	8.18	0.0023	0.9103	39831.1412	0.0033	0.0031	0.0027	0.7063	0.7402	0.8537
7	2 vueltas	167	22261.1	155	20661.5	116	15462.8	19	8.11	0.0023	0.9181	40174.9365	0.0033	0.0032	0.0027	0.7146	0.7417	0.8574
8	2 vueltas	168	22394.4	154	20528.2	115	15329.5	19	8	0.0024	0.9307	40727.3418	0.0033	0.0031	0.0027	0.7222	0.7543	0.8729
9	2 vueltas	166	22127.8	153	20394.9	115	15329.5	19	8.31	0.0023	0.8960	39208.0307	0.0033	0.0031	0.0027	0.6995	0.7286	0.8404
1	2 vueltas	162	21594.6	204	27193.2	170	22661	19	7.01	0.0027	1.0622	46479.1348	0.0032	0.0036	0.0033	0.8394	0.7480	0.8194
2	2 vueltas	164	21861.2	204	27193.2	168	22394.4	19	6.96	0.0027	1.0698	46813.0366	0.0032	0.0036	0.0033	0.8402	0.7533	0.8301
3	2 vueltas	165	21994.5	204	27193.2	166	22127.8	19	7.23	0.0026	1.0299	45064.8319	0.0033	0.0036	0.0033	0.8064	0.7252	0.8039
4	2 vueltas	166	22127.8	204	27193.2	168	22394.4	19	7.47	0.0025	0.9968	43616.9658	0.0033	0.0036	0.0033	0.7781	0.7019	0.7735
5	2 vueltas	165	21994.5	199	26526.7	167	22261.1	19	6.82	0.0028	1.0918	47774.0080	0.0033	0.0036	0.0033	0.8549	0.7784	0.8497
6	2 vueltas	166	22127.8	195	25993.5	168	22394.4	19	7.12	0.0027	1.0458	45761.0583	0.0033	0.0035	0.0033	0.8164	0.7532	0.8115
7	2 vueltas	165	21994.5	197	26260.1	168	22394.4	19	7.04	0.0027	1.0576	46281.0703	0.0033	0.0036	0.0033	0.8281	0.7579	0.8207
8	2 vueltas	165	21994.5	197	26260.1	167	22261.1	19	6.82	0.0028	1.0918	47774.0080	0.0033	0.0036	0.0033	0.8549	0.7824	0.8497
9	2 vueltas	165	21994.5	197	26260.1	167	22261.1	19	7.32	0.0026	1.0172	44510.7561	0.0033	0.0036	0.0033	0.7965	0.7289	0.7917
1	2 vueltas	228	30392.4	146	19461.8	149	19861.7	19	6.96	0.0027	1.0698	46813.0366	0.0038	0.0031	0.0031	0.7126	0.8905	0.8815
2	2 vueltas	226	30125.8	146	19461.8	148	19728.4	19	7.26	0.0026	1.0256	44878.6136	0.0038	0.0031	0.0031	0.6862	0.8537	0.8479
3	2 vueltas	226	30125.8	146	19461.8	146	19461.8	19	7.36	0.0026	1.0117	44268.8496	0.0038	0.0031	0.0031	0.6768	0.8421	0.8421
4	2 vueltas	227	30259.1	147	19595.1	145	19328.5	19	7.25	0.0026	1.0270	44940.5151	0.0038	0.0031	0.0031	0.6856	0.8520	0.8578
5	2 vueltas	220	29326	144	19195.2	145	19328.5	19	7.45	0.0026	0.9994	43734.0584	0.0038	0.0030	0.0031	0.6777	0.8377	0.8348
6	2 vueltas	205	27326.5	138	18395.4	131	17462.3	19	7.96	0.0024	0.9354	40932.0019	0.0035	0.0030	0.0029	0.6571	0.8009	0.8220
7	2 vueltas	204	27193.2	128	17062.4	128	17062.4	19	7.49	0.0025	0.9941	43500.4986	0.0036	0.0029	0.0029	0.7000	0.8838	0.8838
8	2 vueltas	205	27326.5	128	17062.4	126	16796.8	19	7.67	0.0025	0.9708	42479.6284	0.0036	0.0029	0.0028	0.6819	0.8630	0.8698
9	2 vueltas	200	26680	120	15996	128	17062.4	19	7.4	0.0026	1.0062	44029.5588	0.0036	0.0028	0.0029	0.7156	0.8238	0.8945

1	3 vueltas	190	25327	175	23327.5	158	21061.4	19	7.31	0.0026	1.0186	44571.6463	0.0035	0.0034	0.0032	0.7432	0.7744	0.8150
2	3 vueltas	185	24660.5	180	23994	158	21061.4	19	7.91	0.0024	0.9413	41190.7376	0.0035	0.0034	0.0032	0.6961	0.7057	0.7532
3	3 vueltas	185	24660.5	180	23994	160	21328	19	7.86	0.0024	0.9473	41452.7652	0.0035	0.0034	0.0032	0.7005	0.7102	0.7532
4	3 vueltas	185	24660.5	185	24660.5	155	20661.5	19	7.6	0.0025	0.9797	42670.8862	0.0035	0.0035	0.0032	0.7245	0.7245	0.7915
5	3 vueltas	185	24660.5	180	23994	160	21328	19	8.12	0.0023	0.9170	40125.4599	0.0035	0.0034	0.0032	0.6781	0.6874	0.7291
6	3 vueltas	185	24660.5	180	23994	160	21328	19	7.5	0.0025	0.9928	43442.4980	0.0035	0.0034	0.0032	0.7341	0.7443	0.7894
7	3 vueltas	185	24660.5	180	23994	145	19328.5	19	7.87	0.0024	0.9461	41400.0934	0.0035	0.0034	0.0031	0.6996	0.7093	0.7902
8	3 vueltas	185	24660.5	180	23994	145	19328.5	19	7.79	0.0024	0.9558	41825.2548	0.0035	0.0034	0.0031	0.7068	0.7165	0.7984
9	3 vueltas	185	24660.5	180	23994	145	19328.5	19	7.42	0.0026	1.0035	43910.8807	0.0035	0.0034	0.0031	0.7420	0.7523	0.8382
1	3 vueltas	221	29459.3	221	29459.3	189	25193.7	19	6.7	0.0028	1.1113	48629.6619	0.0038	0.0038	0.0035	0.7519	0.7519	0.8130
2	3 vueltas	214	28526.2	223	29725.9	188	25060.4	19	6.83	0.0028	1.0902	47704.0607	0.0037	0.0038	0.0035	0.7495	0.7343	0.7997
3	3 vueltas	214	28526.2	221	29459.3	188	25060.4	19	6.59	0.0029	1.1299	49441.3862	0.0037	0.0038	0.0035	0.7768	0.7644	0.8288
4	3 vueltas	212	28259.6	217	28926.1	189	25193.7	19	6.73	0.0028	1.1064	48412.8878	0.0037	0.0037	0.0035	0.7643	0.7554	0.8094
5	3 vueltas	208	27726.4	205	27326.5	184	24527.2	19	6.89	0.0028	1.0807	47288.6408	0.0037	0.0036	0.0034	0.7536	0.7591	0.8013
6	3 vueltas	210	27993	205	27326.5	182	24260.6	19	6.38	0.0030	1.1671	51068.7672	0.0037	0.0036	0.0034	0.8100	0.8198	0.8701
7	3 vueltas	210	27993	205	27326.5	185	24660.5	19	6.3	0.0030	1.1819	51717.2595	0.0037	0.0036	0.0035	0.8203	0.8302	0.8740
8	3 vueltas	209	27859.7	208	27726.4	185	24660.5	19	6.54	0.0029	1.1385	49819.3784	0.0037	0.0037	0.0035	0.7921	0.7940	0.8419
9	3 vueltas	210	27993	205	27326.5	184	24527.2	19	6.41	0.0030	1.1616	50629.7558	0.0037	0.0036	0.0034	0.8062	0.8160	0.8613
1	3 vueltas	258	34391.4	191	25460.3	202	26926.6	19	6.74	0.0028	1.1047	48341.0586	0.0041	0.0035	0.0036	0.6917	0.8040	0.7818
2	3 vueltas	253	33724.9	191	25460.3	199	26526.7	19	6.8	0.0028	1.0950	47914.5198	0.0040	0.0035	0.0036	0.6924	0.7969	0.7807
3	3 vueltas	245	32658.5	183	24393.9	196	26126.8	19	6.99	0.0027	1.0652	46612.1223	0.0040	0.0034	0.0036	0.6845	0.7920	0.7653
4	3 vueltas	248	33058.4	182	24260.6	193	25726.9	19	7.08	0.0027	1.0517	46019.5953	0.0040	0.0034	0.0035	0.6717	0.7841	0.7614
5	3 vueltas	246	32791.8	186	24793.8	192	25593.6	19	6.67	0.0028	1.1163	48848.3860	0.0040	0.0035	0.0035	0.7159	0.8233	0.8103
6	3 vueltas	243	32391.9	178	23727.4	190	25327	19	7.13	0.0027	1.0443	45696.8772	0.0040	0.0034	0.0035	0.6738	0.7873	0.7620
7	3 vueltas	245	32658.5	178	23727.4	192	25593.6	19	7.04	0.0027	1.0576	46281.0703	0.0040	0.0034	0.0035	0.6796	0.7973	0.7677
8	3 vueltas	246	32791.8	170	22661	190	25327	19	6.6	0.0029	1.1282	49366.4750	0.0040	0.0033	0.0035	0.7234	0.8703	0.8232
9	3 vueltas	242	32258.6	166	22127.8	190	25327	19	6.67	0.0028	1.1163	48848.3860	0.0039	0.0033	0.0035	0.7217	0.8714	0.8145
1	TA	214	28526.2	190	25327	155	20661.5	19	7.34	0.0026	1.0144	44389.4734	0.0037	0.0035	0.0032	0.6975	0.7402	0.8195
2	TA	213	28392.9	190	25327	154	20528.2	19	7.24	0.0026	1.0284	45002.5877	0.0037	0.0035	0.0031	0.7087	0.7504	0.8335
3	TA	213	28392.9	190	25327	153	20394.9	19	7.63	0.0025	0.9759	42702.3243	0.0037	0.0035	0.0031	0.6725	0.7121	0.7935
4	TA	212	28259.6	190	25327	153	20394.9	19	7.03	0.0027	1.0592	46346.9040	0.0037	0.0035	0.0031	0.7316	0.7728	0.8612
5	TA	212	28259.6	189	25193.7	154	20528.2	19	7.46	0.0025	0.9981	43675.4336	0.0037	0.0035	0.0031	0.6895	0.7302	0.8089
6	TA	213	28392.9	190	25327	154	20528.2	19	7.5	0.0025	0.9928	43442.4980	0.0037	0.0035	0.0031	0.6842	0.7244	0.8046
7	TA	213	28392.9	191	25460.3	153	20394.9	19	7.54	0.0025	0.9875	43212.0338	0.0037	0.0035	0.0031	0.6805	0.7187	0.8030
8	TA	213	28392.9	190	25327	154	20528.2	19	7.49	0.0025	0.9941	43500.4986	0.0037	0.0035	0.0031	0.6851	0.7254	0.8057
9	TA	213	28392.9	190	25327	154	20528.2	19	7.51	0.0025	0.9915	43384.6518	0.0037	0.0035	0.0031	0.6833	0.7234	0.8036
1	TA	260	34658	191	25460.3	188	25060.4	19	7.21	0.0026	1.0327	45189.8384	0.0041	0.0035	0.0035	0.6442	0.7516	0.7575
2	TA	257	34258.1	190	25327	188	25060.4	19	6.89	0.0028	1.0807	47288.6408	0.0041	0.0035	0.0035	0.6780	0.7885	0.7927
3	TA	260	34658	190	25327	187	24927.1	19	7.12	0.0027	1.0458	45761.0583	0.0041	0.0035	0.0035	0.6523	0.7631	0.7692
4	TA	255	33991.5	189	25193.7	188	25060.4	19	6.61	0.0029	1.1265	49291.7904	0.0041	0.0035	0.0035	0.7095	0.8241	0.8263
5	TA	255	33991.5	184	24527.2	186	24793.8	19	7	0.0027	1.0637	46545.5335	0.0041	0.0034	0.0035	0.6700	0.7887	0.7844
6	TA	255	33991.5	187	24927.1	188	25060.4	19	7.15	0.0027	1.0414	45569.0538	0.0041	0.0035	0.0035	0.6559	0.7659	0.7639
7	TA	255	33991.5	185	24660.5	184	24527.2	19	7.05	0.0027	1.0561	46215.4234	0.0041	0.0035	0.0034	0.6652	0.7810	0.7831
8	TA	253	33724.9	187	24927.1	182	24260.6	19	7.01	0.0027	1.0622	46479.1348	0.0040	0.0035	0.0034	0.6716	0.7812	0.7919
9	TA	255	33991.5	187	24927.1	180	23994	19	7.01	0.0027	1.0622	46479.1348	0.0041	0.0035	0.0034	0.6690	0.7812	0.7963
1	TA	261	34791.3	178	23727.4	210	27993	19	6.66	0.0029	1.1180	48921.7319	0.0041	0.0034	0.0037	0.6960	0.8428	0.7760
2	TA	259	34524.7	178	23727.4	206	27459.8	19	6.55	0.0029	1.1368	49743.3183	0.0041	0.0034	0.0036	0.7104	0.8570	0.7966
3	TA	260	34658	179	23860.7	206	27459.8	19	6.51	0.0029	1.1438	50048.9608	0.0041	0.0034	0.0036	0.7134	0.8598	0.8015
4	TA	260	34658	180	23994	206	27459.8	19	6.72	0.0028	1.1080	48484.9308	0.0041	0.0034	0.0036	0.6911	0.8306	0.7765
5	TA	260	34658	182	24260.6	205	27326.5	19	6.78	0.0028	1.0982	48055.8606	0.0041	0.0034	0.0036	0.6850	0.8188	0.7715
6	TA	260	34658	180	23994	205	27326.5	19	6.57	0.0029	1.1333	49591.8927	0.0041	0.0034	0.0036	0.7069	0.8496	0.7961
7	TA	260	34658	183	24393.9	204	27193.2	19	6.67	0.0028	1.1163	48848.3860	0.0041	0.0034	0.0036	0.6963	0.8300	0.7861
8	TA	261	34791.3	183	24393.9	206	27459.8	19	6.76	0.0028	1.1015	48198.0377	0.0041	0.0034	0.0036	0.6857	0.8189	0.7719
9	TA	258	34391.4	183	24393.9	206	27459.8	19	6.65	0.0029	1.1197	48995.2985	0.0041	0.0034	0.0036	0.7011	0.8325	0.7846

Tabla C.2 Resultados experimentales obtenidos con la placa de orificio 2

	Posición de la válvula	$\Delta P$ (mmHg)	$\Delta P$ (Pa)	$\Delta P$ (mmHg)	$\Delta P$ (Pa)	$\Delta P$ (mmHg)	$\Delta P$ (Pa)	Volumen (l)	Tiempo (s)	Flujo Real (m <sup>3</sup> /s)	Vel (m/s)	Re	Flujo $\Delta P1$ (m <sup>3</sup> /s)	Flujo $\Delta P2$ (m <sup>3</sup> /s)	Flujo $\Delta P3$ (m <sup>3</sup> /s)	CD 1	CD 2	CD 3
1	5/6 vuelta	47	6265.1	45	5998.5	42	5598.6	19	16.67	0.0011	0.4467	19545.2150	0.0017	0.0017	0.0016	0.6553	0.6697	0.6932
2	5/6 vuelta	47	6265.1	45	5998.5	42	5598.6	19	16.48	0.0012	0.4518	19770.5543	0.0017	0.0017	0.0016	0.6626	0.6774	0.7012
3	5/6 vuelta	46	6131.8	44	5865.2	42	5598.6	19	16.17	0.0012	0.4605	20149.5816	0.0017	0.0017	0.0016	0.6829	0.6982	0.7146
4	5/6 vuelta	47	6265.1	45	5998.5	42	5598.6	19	16.42	0.0012	0.4535	19842.7975	0.0017	0.0017	0.0016	0.6653	0.6799	0.7038
5	5/6 vuelta	43	5731.9	42	5598.6	38	5065.4	19	19.05	0.0010	0.3909	17103.3457	0.0017	0.0016	0.0016	0.5995	0.6066	0.6377
6	5/6 vuelta	43	5731.9	35	4665.5	35	4665.5	19	20.4	0.0009	0.3650	15971.5066	0.0017	0.0015	0.0015	0.5598	0.6205	0.6205
7	5/6 vuelta	43	5731.9	37	4932.1	35	4665.5	19	19.83	0.0010	0.3755	16430.5968	0.0017	0.0015	0.0015	0.5759	0.6209	0.6384
8	5/6 vuelta	43	5731.9	37	4932.1	34	4532.2	19	19.41	0.0010	0.3836	16786.1275	0.0017	0.0015	0.0015	0.5884	0.6343	0.6617
9	5/6 vuelta	43	5731.9	39	5198.7	35	4665.5	19	19.73	0.0010	0.3774	16513.8740	0.0017	0.0016	0.0015	0.5788	0.6078	0.6416
1	5/6 vuelta	50	6665	46	6131.8	45	5998.5	19	17.5	0.0011	0.4255	18618.2134	0.0018	0.0017	0.0017	0.6052	0.6310	0.6379
2	5/6 vuelta	52	6931.6	47	6265.1	44	5865.2	19	16.98	0.0011	0.4385	19188.3825	0.0018	0.0017	0.0017	0.6116	0.6433	0.6649
3	5/6 vuelta	52	6931.6	46	6131.8	43	5731.9	19	17	0.0011	0.4380	19165.8079	0.0018	0.0017	0.0017	0.6109	0.6495	0.6718
4	5/6 vuelta	51	6798.3	45	5998.5	42	5598.6	19	17.82	0.0011	0.4178	18283.8796	0.0018	0.0017	0.0016	0.5885	0.6265	0.6485
5	5/6 vuelta	52	6931.6	47	6265.1	45	5998.5	19	17.05	0.0011	0.4367	19109.6032	0.0018	0.0017	0.0017	0.6091	0.6407	0.6548
6	5/6 vuelta	52	6931.6	47	6265.1	44	5865.2	19	17.87	0.0011	0.4167	18232.7216	0.0018	0.0017	0.0017	0.5812	0.6113	0.6318
7	5/6 vuelta	51	6798.3	45	5998.5	43	5731.9	19	18.3	0.0010	0.4069	17804.3024	0.0018	0.0017	0.0017	0.5730	0.6100	0.6241
8	5/6 vuelta	51	6798.3	45	5998.5	43	5731.9	19	18.37	0.0010	0.4053	17736.4581	0.0018	0.0017	0.0017	0.5709	0.6077	0.6217
9	5/6 vuelta	51	6798.3	45	5998.5	43	5731.9	19	17.99	0.0011	0.4139	18111.1025	0.0018	0.0017	0.0017	0.5829	0.6206	0.6348
1	5/6 vuelta	48	6398.4	45	5998.5	43	5731.9	19	17.91	0.0011	0.4157	18192.0008	0.0018	0.0017	0.0017	0.6035	0.6233	0.6377
2	5/6 vuelta	47	6265.1	45	5998.5	43	5731.9	19	17.18	0.0011	0.4334	18965.0020	0.0017	0.0017	0.0017	0.6358	0.6498	0.6648
3	5/6 vuelta	47	6265.1	45	5998.5	43	5731.9	19	17.85	0.0011	0.4171	18253.1504	0.0017	0.0017	0.0017	0.6120	0.6254	0.6398
4	5/6 vuelta	48	6398.4	45	5998.5	43	5731.9	19	17.81	0.0011	0.4181	18294.1457	0.0018	0.0017	0.0017	0.6069	0.6268	0.6412
5	5/6 vuelta	48	6398.4	45	5998.5	43	5731.9	19	17.36	0.0011	0.4289	18768.3603	0.0018	0.0017	0.0017	0.6227	0.6431	0.6579
6	5/6 vuelta	49	6531.7	46	6131.8	44	5865.2	19	16.99	0.0011	0.4382	19177.0886	0.0018	0.0017	0.0017	0.6297	0.6499	0.6645
7	5/6 vuelta	49	6531.7	45	5998.5	44	5865.2	19	17.67	0.0011	0.4214	18439.0908	0.0018	0.0017	0.0017	0.6055	0.6318	0.6389
8	5/6 vuelta	47	6265.1	46	6131.8	44	5865.2	19	18.56	0.0010	0.4012	17554.8887	0.0017	0.0017	0.0017	0.5886	0.5949	0.6083
9	5/6 vuelta	48	6398.4	45	5998.5	44	5865.2	19	17.42	0.0011	0.4274	18703.7161	0.0018	0.0017	0.0017	0.6205	0.6409	0.6481
1	1 vuelta	65	8664.5	60	7998	40	5332	19	14.78	0.0013	0.5038	22044.5693	0.0020	0.0020	0.0016	0.6285	0.6541	0.8012
2	1 vuelta	65	8664.5	58	7731.4	40	5332	19	15.38	0.0012	0.4841	21184.5731	0.0020	0.0019	0.0016	0.6040	0.6394	0.7699
3	1 vuelta	65	8664.5	58	7731.4	39	5198.7	19	15.24	0.0012	0.4886	21379.1821	0.0020	0.0019	0.0016	0.6095	0.6452	0.7869
4	1 vuelta	65	8664.5	58	7731.4	38	5065.4	19	15.08	0.0013	0.4938	21606.0169	0.0020	0.0019	0.0016	0.6160	0.6521	0.8056
5	1 vuelta	64	8531.2	57	7598.1	38	5065.4	19	15.25	0.0012	0.4883	21365.1629	0.0020	0.0019	0.0016	0.6138	0.6504	0.7966
6	1 vuelta	63	8397.9	57	7598.1	38	5065.4	19	14.73	0.0013	0.5055	22119.3982	0.0020	0.0019	0.0016	0.6405	0.6734	0.8248
7	1 vuelta	63	8397.9	57	7598.1	38	5065.4	19	15.24	0.0012	0.4886	21379.1821	0.0020	0.0019	0.0016	0.6191	0.6509	0.7972
8	1 vuelta	64	8531.2	58	7731.4	38	5065.4	19	15.05	0.0013	0.4947	21649.0854	0.0020	0.0019	0.0016	0.6220	0.6534	0.8072
9	1 vuelta	64	8531.2	56	7464.8	39	5198.7	19	15.11	0.0013	0.4928	21563.1194	0.0020	0.0019	0.0016	0.6195	0.6623	0.7936
1	1 vuelta	69	9197.7	60	7998	53	7064.9	19	15.12	0.0013	0.4925	21548.8581	0.0021	0.0020	0.0018	0.5963	0.6394	0.6803
2	1 vuelta	69	9197.7	60	7998	53	7064.9	19	14.07	0.0014	0.5292	23156.9819	0.0021	0.0020	0.0018	0.6408	0.6871	0.7311
3	1 vuelta	69	9197.7	60	7998	50	6665	19	14.5	0.0013	0.5135	22470.2576	0.0021	0.0020	0.0018	0.6218	0.6668	0.7304
4	1 vuelta	68	9064.4	60	7998	50	6665	19	15.17	0.0013	0.4908	21477.8335	0.0021	0.0020	0.0018	0.5987	0.6373	0.6981
5	1 vuelta	68	9064.4	60	7998	49	6531.7	19	14.42	0.0013	0.5164	22594.9192	0.0021	0.0020	0.0018	0.6298	0.6705	0.7419
6	1 vuelta	68	9064.4	60	7998	49	6531.7	19	14.23	0.0013	0.5232	22896.6082	0.0021	0.0020	0.0018	0.6382	0.6794	0.7518
7	1 vuelta	68	9064.4	61	8131.3	48	6398.4	19	14.56	0.0013	0.5114	22377.6604	0.0021	0.0020	0.0018	0.6237	0.6586	0.7424
8	1 vuelta	65	8664.5	60	7998	48	6398.4	19	14.72	0.0013	0.5058	22134.4249	0.0020	0.0020	0.0018	0.6310	0.6568	0.7343
9	1 vuelta	65	8664.5	60	7998	47	6265.1	19	14.74	0.0013	0.5051	22104.3918	0.0020	0.0020	0.0017	0.6302	0.6559	0.7411
1	1 vuelta	35	4665.5	42	5598.6	35	4665.5	19	14.09	0.0013	0.5284	23124.1118	0.0015	0.0016	0.0015	0.8984	0.8201	0.8984
2	1 vuelta	31	4132.3	42	5598.6	35	4665.5	19	14.16	0.0013	0.5258	23009.7977	0.0014	0.0016	0.0015	0.9499	0.8161	0.8940
3	1 vuelta	31	4132.3	38	5065.4	33	4398.9	19	14.85	0.0013	0.5014	21940.6555	0.0014	0.0016	0.0015	0.9058	0.8181	0.8779
4	1 vuelta	30	3999	38	5065.4	28	3732.4	19	14.48	0.0013	0.5142	22501.2938	0.0014	0.0016	0.0013	0.9443	0.8390	0.9774
5	1 vuelta	29	3865.7	25	3332.5	22	2932.6	19	14.42	0.0013	0.5164	22594.9192	0.0014	0.0013	0.0012	0.9644	1.0387	1.1072
6	1 vuelta	30	3999	25	3332.5	23	3065.9	19	14.56	0.0013	0.5114	22377.6604	0.0014	0.0013	0.0012	0.9391	1.0287	1.0725
7	1 vuelta	29	3865.7	25	3332.5	23	3065.9	19	14.86	0.0013	0.5011	21925.8906	0.0014	0.0013	0.0012	0.9358	1.0079	1.0508
8	1 vuelta	28	3732.4	22	2932.6	20	2666	19	14.49	0.0013	0.5139	22485.7850	0.0013	0.0012	0.0011	0.9767	1.1019	1.1557
9	1 vuelta	28	3732.4	23	3065.9	20	2666	19	15.17	0.0013	0.4908	21477.8335	0.0013	0.0012	0.0011	0.9329	1.0294	1.1039

1	1 1/3 vuelta	127	16929.1	115	15329.5	100	13330	19	10.3	0.0018	0.7229	31632.8869	0.0029	0.0027	0.0025	0.6452	0.6780	0.7271
2	1 1/3 vuelta	125	16662.5	117	15596.1	98	13063.4	19	10.78	0.0018	0.6907	30224.3724	0.0028	0.0027	0.0025	0.6214	0.6423	0.7018
3	1 1/3 vuelta	125	16662.5	117	15596.1	98	13063.4	19	10.15	0.0019	0.7336	32100.3680	0.0028	0.0027	0.0025	0.6599	0.6821	0.7453
4	1 1/3 vuelta	126	16795.8	119	15862.7	98	13063.4	19	10.53	0.0018	0.7071	30941.9501	0.0028	0.0028	0.0025	0.6336	0.6520	0.7184
5	1 1/3 vuelta	126	16795.8	119	15862.7	98	13063.4	19	10.16	0.0019	0.7329	32068.7731	0.0028	0.0028	0.0025	0.6567	0.6757	0.7446
6	1 1/3 vuelta	126	16795.8	119	15862.7	98	13063.4	19	10.35	0.0018	0.7194	31480.0710	0.0028	0.0028	0.0025	0.6446	0.6633	0.7309
7	1 1/3 vuelta	126	16795.8	118	15729.4	97	12930.1	19	10.1	0.0019	0.7372	32259.2807	0.0028	0.0028	0.0025	0.6606	0.6826	0.7529
8	1 1/3 vuelta	126	16795.8	118	15729.4	98	13063.4	19	10.48	0.0018	0.7105	31089.5739	0.0028	0.0028	0.0025	0.6366	0.6578	0.7218
9	1 1/3 vuelta	126	16795.8	118	15729.4	98	13063.4	19	11.06	0.0017	0.6732	29459.1984	0.0028	0.0028	0.0025	0.6032	0.6233	0.6840
1	1 1/3 vuelta	127	16929.1	118	15729.4	105	13996.5	19	10.55	0.0018	0.7058	30883.2924	0.0029	0.0028	0.0026	0.6299	0.6535	0.6927
2	1 1/3 vuelta	127	16929.1	118	15729.4	105	13996.5	19	10.35	0.0018	0.7194	31480.0710	0.0029	0.0028	0.0026	0.6421	0.6661	0.7061
3	1 1/3 vuelta	130	17329	118	15729.4	107	14263.1	19	10.42	0.0018	0.7146	31268.5926	0.0029	0.0028	0.0026	0.6303	0.6616	0.6948
4	1 1/3 vuelta	130	17329	118	15729.4	105	13996.5	19	10.91	0.0017	0.6825	29864.2287	0.0029	0.0028	0.0026	0.6020	0.6319	0.6699
5	1 1/3 vuelta	129	17195.7	118	15729.4	107	14263.1	19	10.55	0.0018	0.7058	30883.2924	0.0029	0.0028	0.0026	0.6250	0.6535	0.6862
6	1 1/3 vuelta	130	17329	118	15729.4	107	14263.1	19	10.53	0.0018	0.7071	30941.9501	0.0029	0.0028	0.0026	0.6238	0.6547	0.6875
7	1 1/3 vuelta	129	17195.7	118	15729.4	105	13996.5	19	10.6	0.0018	0.7024	30737.6165	0.0029	0.0028	0.0026	0.6220	0.6504	0.6895
8	1 1/3 vuelta	130	17329	118	15729.4	105	13996.5	19	10.49	0.0018	0.7098	31059.9366	0.0029	0.0028	0.0026	0.6261	0.6572	0.6967
9	1 1/3 vuelta	130	17329	118	15729.4	105	13996.5	19	10.32	0.0018	0.7215	31571.5828	0.0029	0.0028	0.0026	0.6365	0.6680	0.7082
1	1 1/3 vuelta	130	17329	110	14663	97	12930.1	19	11.11	0.0017	0.6702	29326.6188	0.0029	0.0027	0.0025	0.5912	0.6427	0.6844
2	1 1/3 vuelta	105	13996.5	95	12663.5	85	11330.5	19	11.48	0.0017	0.6486	28381.4229	0.0026	0.0025	0.0023	0.6366	0.6693	0.7076
3	1 1/3 vuelta	105	13996.5	96	12796.8	84	11197.2	19	11.55	0.0016	0.6447	28209.4143	0.0026	0.0025	0.0023	0.6328	0.6618	0.7075
4	1 1/3 vuelta	95	12663.5	96	12796.8	85	11330.5	19	11.85	0.0016	0.6283	27495.2519	0.0025	0.0025	0.0023	0.6484	0.6450	0.6855
5	1 1/3 vuelta	93	12396.9	89	11863.7	85	11330.5	19	12.49	0.0015	0.5961	26086.3679	0.0024	0.0024	0.0023	0.6217	0.6356	0.6503
6	1 1/3 vuelta	95	12663.5	88	11730.4	85	11330.5	19	12.17	0.0016	0.6118	26772.2872	0.0025	0.0024	0.0023	0.6313	0.6560	0.6675
7	1 1/3 vuelta	95	12663.5	87	11597.1	85	11330.5	19	12.05	0.0016	0.6179	27038.8992	0.0025	0.0024	0.0023	0.6376	0.6663	0.6741
8	1 1/3 vuelta	95	12663.5	86	11463.8	85	11330.5	19	12.08	0.0016	0.6164	26971.7496	0.0025	0.0024	0.0023	0.6360	0.6685	0.6724
9	1 1/3 vuelta	95	12663.5	87	11597.1	84	11197.2	19	12.36	0.0015	0.6024	26360.7391	0.0025	0.0024	0.0023	0.6216	0.6496	0.6611
1	2 vueltas	210	27993	159	21194.7	145	19328.5	19	8.22	0.0023	0.9058	39637.3157	0.0037	0.0032	0.0031	0.6287	0.7225	0.7566
2	2 vueltas	208	27726.4	158	21061.4	142	18928.6	19	8.22	0.0023	0.9058	39637.3157	0.0037	0.0032	0.0030	0.6317	0.7248	0.7645
3	2 vueltas	208	27726.4	155	20661.5	143	19061.9	19	8.82	0.0022	0.8442	36940.8996	0.0037	0.0032	0.0030	0.5887	0.6820	0.7100
4	2 vueltas	208	27726.4	154	20528.2	143	19061.9	19	8.25	0.0023	0.9025	39493.1800	0.0037	0.0031	0.0030	0.6294	0.7315	0.7591
5	2 vueltas	207	27593.1	153	20394.9	143	19061.9	19	7.94	0.0024	0.9378	41035.1051	0.0037	0.0031	0.0030	0.6556	0.7625	0.7887
6	2 vueltas	205	27326.5	154	20528.2	145	19328.5	19	8.06	0.0024	0.9238	40424.1606	0.0036	0.0031	0.0031	0.6489	0.7487	0.7716
7	2 vueltas	207	27593.1	152	20261.6	145	19328.5	19	7.88	0.0024	0.9449	41347.5552	0.0037	0.0031	0.0031	0.6606	0.7709	0.7892
8	2 vueltas	210	27993	156	20794.8	145	19328.5	19	7.84	0.0024	0.9497	41558.5121	0.0037	0.0032	0.0031	0.6592	0.7648	0.7933
9	2 vueltas	211	28126.3	158	21061.4	145	19328.5	19	8.31	0.0023	0.8960	39208.0307	0.0037	0.0032	0.0031	0.6204	0.7170	0.7484
1	2 vueltas	236	31458.8	235	31325.5	185	24660.5	19	6.94	0.0027	1.0729	46947.9445	0.0039	0.0039	0.0035	0.7024	0.7039	0.7934
2	2 vueltas	235	31325.5	231	30792.3	180	23994	19	7.13	0.0027	1.0443	45696.8772	0.0039	0.0039	0.0034	0.6852	0.6911	0.7829
3	2 vueltas	233	31058.9	231	30792.3	180	23994	19	7.07	0.0027	1.0532	46084.6867	0.0039	0.0039	0.0034	0.6939	0.6969	0.7895
4	2 vueltas	230	30659	230	30659	180	23994	19	7.26	0.0026	1.0256	44878.6136	0.0038	0.0038	0.0034	0.6802	0.6802	0.7689
5	2 vueltas	232	30925.6	231	30792.3	180	23994	19	7.44	0.0026	1.0008	43792.8407	0.0039	0.0039	0.0034	0.6608	0.6623	0.7503
6	2 vueltas	230	30659	228	30392.4	181	24127.3	19	7.18	0.0026	1.0370	45378.6539	0.0038	0.0038	0.0034	0.6877	0.6908	0.7753
7	2 vueltas	232	30925.6	225	29992.5	182	24260.6	19	7.27	0.0026	1.0242	44816.8824	0.0039	0.0038	0.0034	0.6763	0.6867	0.7636
8	2 vueltas	228	30392.4	225	29992.5	178	23727.4	19	7.26	0.0026	1.0256	44878.6136	0.0038	0.0038	0.0034	0.6831	0.6877	0.7732
9	2 vueltas	230	30659	229	30525.7	177	23594.1	19	7.55	0.0025	0.9862	43154.7993	0.0038	0.0038	0.0034	0.6540	0.6555	0.7456
1	2 vueltas	222	29592.6	178	23727.4	180	23994	19	7.04	0.0027	1.0576	46281.0703	0.0038	0.0034	0.0034	0.7140	0.7973	0.7929
2	2 vueltas	214	28526.2	178	23727.4	180	23994	19	7.29	0.0026	1.0214	44693.9280	0.0037	0.0034	0.0034	0.7022	0.7700	0.7657
3	2 vueltas	215	28659.5	175	23327.5	179	23860.7	19	6.99	0.0027	1.0652	46612.1223	0.0037	0.0034	0.0034	0.7307	0.8099	0.8008
4	2 vueltas	204	27193.2	175	23327.5	178	23727.4	19	7.14	0.0027	1.0428	45632.8760	0.0036	0.0034	0.0034	0.7344	0.7929	0.7862
5	2 vueltas	203	27059.9	178	23727.4	178	23727.4	19	6.91	0.0027	1.0775	47151.7706	0.0036	0.0034	0.0034	0.7607	0.8123	0.8123
6	2 vueltas	203	27059.9	175	23327.5	179	23860.7	19	7.22	0.0026	1.0313	45127.2486	0.0036	0.0034	0.0034	0.7280	0.7841	0.7753
7	2 vueltas	204	27193.2	178	23727.4	178	23727.4	19	7.4	0.0026	1.0062	44029.5588	0.0036	0.0034	0.0034	0.7086	0.7585	0.7585
8	2 vueltas	202	26926.6	178	23727.4	178	23727.4	19	7.3	0.0026	1.0200	44632.7034	0.0036	0.0034	0.0034	0.7218	0.7689	0.7689
9	2 vueltas	201	26793.3	175	23327.5	178	23727.4	19	7.38	0.0026	1.0089	44148.8801	0.0036	0.0034	0.0034	0.7158	0.7671	0.7606

1	3 vueltas	220	29326	195	25993.5	163	21727.9	19	8.15	0.0023	0.9136	39977.7589	0.0038	0.0035	0.0032	0.6195	0.6580	0.7197
2	3 vueltas	217	28926.1	192	25593.6	160	21328	19	7.62	0.0025	0.9771	42758.3641	0.0037	0.0035	0.0032	0.6672	0.7093	0.7770
3	3 vueltas	210	27993	189	25193.7	160	21328	19	7.99	0.0024	0.9319	40778.3147	0.0037	0.0035	0.0032	0.6468	0.6818	0.7410
4	3 vueltas	215	28659.5	185	24660.5	155	20661.5	19	8.11	0.0023	0.9181	40174.9365	0.0037	0.0035	0.0032	0.6298	0.6789	0.7417
5	3 vueltas	213	28392.9	184	24527.2	155	20661.5	19	7.93	0.0024	0.9389	41086.8518	0.0037	0.0034	0.0032	0.6471	0.6962	0.7585
6	3 vueltas	215	28659.5	183	24393.9	155	20661.5	19	7.78	0.0024	0.9570	41879.0148	0.0037	0.0034	0.0032	0.6565	0.7116	0.7732
7	3 vueltas	216	28792.8	185	24660.5	157	20928.1	19	7.93	0.0024	0.9389	41086.8518	0.0037	0.0035	0.0032	0.6426	0.6943	0.7537
8	3 vueltas	216	28792.8	184	24527.2	160	21328	19	8.06	0.0024	0.9238	40424.1606	0.0037	0.0034	0.0032	0.6322	0.6850	0.7346
9	3 vueltas	218	29059.4	180	23994	157	20928.1	19	7.85	0.0024	0.9485	41505.5713	0.0037	0.0034	0.0032	0.6461	0.7111	0.7614
1	3 vueltas	280	37324	210	27993	218	29059.4	19	6.58	0.0029	1.1316	49516.5250	0.0042	0.0037	0.0037	0.6802	0.7854	0.7708
2	3 vueltas	279	37190.7	210	27993	219	29192.7	19	6.82	0.0028	1.0918	47774.0080	0.0042	0.0037	0.0038	0.6574	0.7577	0.7420
3	3 vueltas	277	36924.1	200	26660	218	29059.4	19	6.63	0.0029	1.1231	49143.0973	0.0042	0.0036	0.0037	0.6787	0.7987	0.7650
4	3 vueltas	275	36657.5	204	27193.2	217	28926.1	19	6.88	0.0028	1.0822	47357.3742	0.0042	0.0036	0.0037	0.6564	0.7621	0.7389
5	3 vueltas	275	36657.5	205	27326.5	217	28926.1	19	6.97	0.0027	1.0683	46745.8730	0.0042	0.0036	0.0037	0.6479	0.7504	0.7294
6	3 vueltas	276	36790.8	205	27326.5	217	28926.1	19	6.8	0.0028	1.0950	47914.5198	0.0042	0.0036	0.0037	0.6629	0.7692	0.7476
7	3 vueltas	275	36657.5	205	27326.5	217	28926.1	19	7.15	0.0027	1.0414	45569.0538	0.0042	0.0036	0.0037	0.6316	0.7315	0.7110
8	3 vueltas	275	36657.5	204	27193.2	217	28926.1	19	6.61	0.0029	1.1265	49291.7904	0.0042	0.0036	0.0037	0.6832	0.7932	0.7691
9	3 vueltas	275	36657.5	205	27326.5	217	28926.1	19	7.07	0.0027	1.0532	46084.6867	0.0042	0.0036	0.0037	0.6388	0.7398	0.7191
1	3 vueltas	256	34124.8	207	27593.1	210	27993	19	6.53	0.0029	1.1403	49895.6715	0.0041	0.0037	0.0037	0.7168	0.7971	0.7914
2	3 vueltas	254	33858.2	204	27193.2	208	27726.4	19	6.65	0.0029	1.1197	48995.2985	0.0040	0.0036	0.0037	0.7066	0.7885	0.7808
3	3 vueltas	253	33724.9	205	27326.5	208	27726.4	19	6.67	0.0028	1.1163	48848.3860	0.0040	0.0036	0.0037	0.7059	0.7842	0.7785
4	3 vueltas	254	33858.2	203	27059.9	208	27726.4	19	6.51	0.0029	1.1438	50048.9608	0.0040	0.0036	0.0037	0.7218	0.8074	0.7976
5	3 vueltas	253	33724.9	199	26526.7	206	27459.8	19	6.73	0.0028	1.1064	48412.8878	0.0040	0.0036	0.0036	0.6996	0.7888	0.7753
6	3 vueltas	252	33591.6	199	26526.7	206	27459.8	19	6.54	0.0029	1.1385	49819.3784	0.0040	0.0036	0.0036	0.7213	0.8117	0.7978
7	3 vueltas	253	33724.9	202	26926.6	207	27593.1	19	6.75	0.0028	1.1031	48269.4422	0.0040	0.0036	0.0037	0.6975	0.7806	0.7711
8	3 vueltas	251	33458.3	202	26926.6	207	27593.1	19	7.09	0.0027	1.0502	45854.6876	0.0040	0.0036	0.0037	0.6667	0.7432	0.7342
9	3 vueltas	250	33325	200	26660	205	27326.5	19	6.79	0.0028	1.0966	47985.0861	0.0040	0.0036	0.0036	0.6976	0.7799	0.7703
1	TA	290	38657	220	29326	250	33325	19	7.1	0.0027	1.0487	45889.9626	0.0043	0.0038	0.0040	0.6194	0.7111	0.6671
2	TA	290	38657	225	29992.5	248	33058.4	19	7.1	0.0027	1.0487	45889.9626	0.0043	0.0038	0.0040	0.6194	0.7032	0.6698
3	TA	295	39323.5	225	29992.5	249	33191.7	19	7.37	0.0026	1.0103	44208.7836	0.0044	0.0038	0.0040	0.5916	0.6774	0.6439
4	TA	293	39056.9	225	29992.5	249	33191.7	19	6.75	0.0028	1.1031	48269.4422	0.0043	0.0038	0.0040	0.6482	0.7396	0.7031
5	TA	293	39056.9	223	29725.9	245	32658.5	19	7.29	0.0026	1.0214	44693.9280	0.0043	0.0038	0.0040	0.6001	0.6879	0.6563
6	TA	290	38657	215	28659.5	240	31992	19	7.37	0.0026	1.0103	44208.7836	0.0043	0.0037	0.0039	0.5967	0.6930	0.6559
7	TA	290	38657	220	29326	245	32658.5	19	7.35	0.0026	1.0130	44329.0796	0.0043	0.0038	0.0040	0.5983	0.6869	0.6510
8	TA	290	38657	215	28659.5	245	32658.5	19	6.94	0.0027	1.0729	46947.9445	0.0043	0.0037	0.0040	0.6337	0.7359	0.6894
9	TA	288	38390.4	217	28926.1	245	32658.5	19	6.77	0.0028	1.0998	48126.8441	0.0043	0.0037	0.0040	0.6518	0.7509	0.7067
1	TA	255	33991.5	215	28659.5	220	29326	19	6.85	0.0028	1.0870	47564.7788	0.0041	0.0037	0.0038	0.6846	0.7456	0.7371
2	TA	255	33991.5	217	28926.1	223	29725.9	19	7.04	0.0027	1.0576	46281.0703	0.0041	0.0037	0.0038	0.6662	0.7221	0.7124
3	TA	248	33058.4	215	28659.5	223	29725.9	19	6.79	0.0028	1.0966	47885.0861	0.0040	0.0037	0.0038	0.7004	0.7522	0.7386
4	TA	245	32658.5	210	27993	220	29326	19	6.8	0.0028	1.0950	47914.5198	0.0040	0.0037	0.0038	0.7036	0.7600	0.7425
5	TA	242	32258.6	210	27993	220	29326	19	6.94	0.0027	1.0729	46947.9445	0.0039	0.0037	0.0038	0.6837	0.7446	0.7275
6	TA	242	32258.6	211	28126.3	215	28659.5	19	6.89	0.0028	1.0807	47288.6408	0.0039	0.0037	0.0037	0.6987	0.7483	0.7413
7	TA	240	31992	211	28126.3	216	28792.8	19	6.51	0.0029	1.1438	50048.9608	0.0039	0.0037	0.0037	0.7426	0.7919	0.7827
8	TA	242	32258.6	208	27726.4	215	28659.5	19	6.65	0.0029	1.1197	48995.2985	0.0039	0.0037	0.0037	0.7239	0.7808	0.7680
9	TA	241	32125.3	209	27859.7	215	28659.5	19	6.66	0.0029	1.1180	48921.7319	0.0039	0.0037	0.0037	0.7243	0.7778	0.7669
1	TA	290	38657	240	31992	225	29992.5	19	7.11	0.0027	1.0472	45825.4198	0.0043	0.0039	0.0038	0.6185	0.6799	0.7022
2	TA	290	38657	258	34391.4	222	29592.6	19	7.42	0.0026	1.0035	43910.8807	0.0043	0.0041	0.0038	0.5927	0.6284	0.6774
3	TA	291	38790.3	235	31325.5	223	29725.9	19	7.31	0.0026	1.0186	44571.6463	0.0043	0.0039	0.0038	0.6006	0.6683	0.6860
4	TA	289	38523.7	235	31325.5	223	29725.9	19	7.35	0.0026	1.0130	44329.0796	0.0043	0.0039	0.0038	0.5994	0.6647	0.6823
5	TA	289	38523.7	235	31325.5	222	29592.6	19	7.18	0.0026	1.0370	45378.6539	0.0043	0.0039	0.0038	0.6135	0.6804	0.7000
6	TA	285	37990.5	237	31592.1	221	29459.3	19	6.67	0.0028	1.1163	48848.3860	0.0043	0.0039	0.0038	0.6651	0.7293	0.7553
7	TA	289	38523.7	237	31592.1	221	29459.3	19	6.91	0.0027	1.0775	47151.7706	0.0043	0.0039	0.0038	0.6375	0.7040	0.7290
8	TA	285	37990.5	228	30392.4	220	29326	19	7.48	0.0025	0.9954	43558.6544	0.0043	0.0038	0.0038	0.5931	0.6631	0.6750
9	TA	289	38523.7	227	30259.1	220	29326	19	7.36	0.0026	1.0117	44268.8498	0.0043	0.0038	0.0038	0.5985	0.6753	0.6860

Tabla C.3 Resultados experimentales obtenidos con la placa de orificio 3

	Posición de la válvula	$\Delta P$ (mmHg)	$\Delta P$ (Pa)	Volumen (l)	Tiempo (s)	Flujo Real (m <sup>3</sup> /s)	Vel (m/s)	Re	Flujo $\Delta P0$ (m <sup>3</sup> /s)	Flujo $\Delta P1$ (m <sup>3</sup> /s)	Flujo $\Delta P2$ (m <sup>3</sup> /s)	Flujo $\Delta P3$ (m <sup>3</sup> /s)	CD 0	CD 1	CD 2	CD 3						
1	5/6 vuelta	34	4532.2	23	3065.9	20	2666	19	2532.7	19	21.29	0.0009	0.3497	15303.8391	0.0015	0.0012	0.0011	0.0011	0.6033	0.7335	0.7866	0.8070
2	5/6 vuelta	34	4532.2	23	3065.9	20	2666	18	2399.4	19	20.96	0.0009	0.3552	15544.7870	0.0015	0.0012	0.0011	0.0011	0.6128	0.7450	0.7989	0.8422
3	5/6 vuelta	35	4665.5	24	3199.2	20	2666	18	2399.4	19	20.25	0.0009	0.3677	16089.8141	0.0015	0.0012	0.0011	0.0011	0.6251	0.7549	0.8269	0.8717
4	5/6 vuelta	35	4665.5	24	3199.2	20	2666	19	2532.7	19	19.51	0.0010	0.3816	16700.0889	0.0015	0.0012	0.0011	0.0011	0.6488	0.7835	0.8583	0.8806
5	5/6 vuelta	36	4798.8	24	3199.2	20	2666	19	2532.7	19	20.13	0.0009	0.3699	16185.7295	0.0015	0.0012	0.0011	0.0011	0.6200	0.7594	0.8319	0.8535
6	5/6 vuelta	35	4665.5	24	3199.2	20	2666	19	2532.7	19	20.74	0.0009	0.3590	15709.6786	0.0015	0.0012	0.0011	0.0011	0.6103	0.7371	0.8074	0.8284
7	5/6 vuelta	36	4798.8	24	3199.2	20	2666	19	2532.7	19	20.03	0.0009	0.3717	16266.5369	0.0015	0.0012	0.0011	0.0011	0.6231	0.7632	0.8360	0.8578
8	5/6 vuelta	36	4798.8	24	3199.2	20	2666	19	2532.7	19	20.25	0.0009	0.3677	16089.8141	0.0015	0.0012	0.0011	0.0011	0.6164	0.7549	0.8269	0.8484
9	5/6 vuelta	37	4932.1	24	3199.2	20	2666	19	2532.7	19	20.12	0.0009	0.3701	16193.7741	0.0015	0.0012	0.0011	0.0011	0.6119	0.7598	0.8323	0.8539
1	5/6 vuelta	39	5198.7	27	3599.1	22	2932.6	21	2799.3	19	20.83	0.0009	0.3575	15641.8020	0.0016	0.0013	0.0012	0.0012	0.5757	0.6919	0.7665	0.7845
2	5/6 vuelta	39	5198.7	26	3465.8	21	2799.3	20	2666	19	20.88	0.0009	0.3566	15604.3455	0.0016	0.0013	0.0012	0.0011	0.5743	0.7034	0.7827	0.8020
3	5/6 vuelta	39	5198.7	26	3465.8	22	2932.6	20	2666	19	20.59	0.0009	0.3616	15824.1251	0.0016	0.0013	0.0012	0.0011	0.5824	0.7133	0.7754	0.8133
4	5/6 vuelta	38	5065.4	25	3332.5	20	2666	20	2666	19	20.05	0.0009	0.3714	16250.3110	0.0016	0.0013	0.0011	0.0011	0.6059	0.7470	0.8352	0.8352
5	5/6 vuelta	38	5065.4	25	3332.5	19	2532.7	19	2532.7	19	20.77	0.0009	0.3585	15686.9877	0.0016	0.0013	0.0011	0.0011	0.5849	0.7211	0.8272	0.8272
6	5/6 vuelta	38	5065.4	25	3332.5	20	2666	19	2532.7	19	19.85	0.0010	0.3751	16414.0421	0.0016	0.0013	0.0011	0.0011	0.6120	0.7546	0.8436	0.8655
7	5/6 vuelta	38	5065.4	25	3332.5	20	2666	19	2532.7	19	20.02	0.0009	0.3719	16274.6621	0.0016	0.0013	0.0011	0.0011	0.6112	0.7481	0.8364	0.8582
8	5/6 vuelta	37	4932.1	25	3332.5	20	2666	19	2532.7	19	20.72	0.0009	0.3594	15724.8424	0.0015	0.0013	0.0011	0.0011	0.5942	0.7229	0.8082	0.8292
9	5/6 vuelta	37	4932.1	24	3199.2	20	2666	19	2532.7	19	20.84	0.0009	0.3573	15634.2963	0.0015	0.0012	0.0011	0.0011	0.5908	0.7335	0.8035	0.8244
1	5/6 vuelta	36	4798.8	25	3332.5	21	2799.3	20	2666	19	20.42	0.0009	0.3646	15955.8636	0.0015	0.0013	0.0012	0.0011	0.6112	0.7335	0.8003	0.8201
2	5/6 vuelta	38	5065.4	25	3332.5	22	2932.6	20	2666	19	19.55	0.0010	0.3809	16665.9199	0.0016	0.0013	0.0012	0.0011	0.6214	0.7661	0.8167	0.8566
3	5/6 vuelta	37	4932.1	25	3332.5	22	2932.6	20	2666	19	19.68	0.0010	0.3783	16555.8300	0.0015	0.0013	0.0012	0.0011	0.6256	0.7611	0.8113	0.8509
4	5/6 vuelta	37	4932.1	25	3332.5	21	2799.3	20	2666	19	19.61	0.0010	0.3797	16614.9278	0.0015	0.0013	0.0012	0.0011	0.6278	0.7638	0.8334	0.8539
5	5/6 vuelta	37	4932.1	25	3332.5	22	2932.6	20	2666	19	19.35	0.0010	0.3848	16838.1775	0.0015	0.0013	0.0012	0.0011	0.6363	0.7740	0.8251	0.8654
6	5/6 vuelta	37	4932.1	25	3332.5	22	2932.6	20	2666	19	19.19	0.0010	0.3880	16978.5688	0.0015	0.0013	0.0012	0.0011	0.6416	0.7805	0.8320	0.8726
7	5/6 vuelta	37	4932.1	25	3332.5	22	2932.6	20	2666	19	20.98	0.0009	0.3549	15529.9683	0.0015	0.0013	0.0012	0.0011	0.5868	0.7139	0.7610	0.7962
8	5/6 vuelta	37	4932.1	25	3332.5	22	2932.6	20	2666	19	19.12	0.0010	0.3894	17040.7288	0.0015	0.0013	0.0012	0.0011	0.6439	0.7634	0.8351	0.8758
9	5/6 vuelta	37	4932.1	25	3332.5	22	2932.6	20	2666	19	19.35	0.0010	0.3848	16838.1775	0.0015	0.0013	0.0012	0.0011	0.6363	0.7740	0.8251	0.8654
1	1 vuelta	57	7598.1	38	5065.4	31	4132.3	30	3999	19	15.18	0.0013	0.4905	21463.6848	0.0019	0.0016	0.0014	0.0014	0.6534	0.8003	0.8861	0.9007
2	1 vuelta	56	7464.8	39	5198.7	31	4132.3	30	3999	19	15	0.0013	0.4964	21721.2490	0.0019	0.0016	0.0014	0.0014	0.6672	0.7995	0.8967	0.9115
3	1 vuelta	56	7464.8	40	5332	31	4132.3	28	3732.4	19	15.41	0.0012	0.4832	21143.3313	0.0019	0.0016	0.0014	0.0013	0.6494	0.7684	0.8728	0.9184
4	1 vuelta	57	7598.1	39	5198.7	30	3999	31	4132.3	19	16.16	0.0012	0.4608	20162.0504	0.0019	0.0016	0.0014	0.0014	0.6138	0.7421	0.8461	0.8323
5	1 vuelta	53	7064.9	36	4798.8	30	3999	28	3732.4	19	15.72	0.0012	0.4737	20726.3826	0.0018	0.0015	0.0014	0.0013	0.6544	0.7940	0.8698	0.9003
6	1 vuelta	53	7064.9	36	4798.8	30	3999	28	3732.4	19	16.22	0.0012	0.4591	20087.4682	0.0018	0.0015	0.0014	0.0013	0.6342	0.7695	0.8430	0.8725
7	1 vuelta	54	7198.2	39	5198.7	30	3999	29	3865.7	19	16.42	0.0012	0.4535	19842.7975	0.0019	0.0016	0.0014	0.0014	0.6207	0.7303	0.8327	0.8469
8	1 vuelta	55	7331.5	41	5465.3	30	3999	30	3999	19	16.04	0.0012	0.4642	20312.8887	0.0019	0.0016	0.0014	0.0014	0.6296	0.7292	0.8524	0.8524
9	1 vuelta	51	6798.3	34	4532.2	29	3865.7	28	3732.4	19	16.17	0.0012	0.4605	20149.5816	0.0018	0.0015	0.0014	0.0013	0.6485	0.7943	0.8600	0.8752
1	1 vuelta	65	8664.5	42	5598.6	34	4532.2	32	4265.6	19	14.88	0.0013	0.5004	21896.4203	0.0020	0.0016	0.0015	0.0014	0.6243	0.7766	0.8631	0.8897
2	1 vuelta	64	8531.2	41	5465.3	35	4665.5	33	4398.9	19	15.15	0.0013	0.4915	21506.1871	0.0020	0.0016	0.0015	0.0015	0.6179	0.7720	0.8355	0.8605
3	1 vuelta	64	8531.2	41	5465.3	34	4532.2	33	4398.9	19	15.14	0.0013	0.4918	21520.3920	0.0020	0.0016	0.0015	0.0015	0.6183	0.7725	0.8483	0.8611
4	1 vuelta	64	8531.2	41	5465.3	34	4532.2	32	4265.6	19	15.39	0.0012	0.4838	21170.8080	0.0020	0.0016	0.0015	0.0014	0.6083	0.7600	0.8345	0.8602
5	1 vuelta	64	8531.2	41	5465.3	32	4265.6	33	4398.9	19	15.84	0.0012	0.4701	20569.3646	0.0020	0.0016	0.0014	0.0015	0.5910	0.7394	0.8358	0.8230
6	1 vuelta	64	8531.2	41	5465.3	33	4398.9	33	4398.9	19	15.15	0.0013	0.4915	21506.1871	0.0020	0.0016	0.0015	0.0015	0.6179	0.7720	0.8605	0.8605
7	1 vuelta	63	8397.9	41	5465.3	33	4398.9	32	4265.6	19	15.23	0.0012	0.4889	21393.2196	0.0020	0.0016	0.0015	0.0014	0.6195	0.7679	0.8560	0.8692
8	1 vuelta	64	8531.2	41	5465.3	34	4532.2	32	4265.6	19	14.59	0.0013	0.5103	22331.6473	0.0020	0.0016	0.0015	0.0014	0.6416	0.8016	0.8803	0.9074
9	1 vuelta	64	8531.2	41	5465.3	34	4532.2	32	4265.6	19	14.95	0.0013	0.4980	21793.8953	0.0020	0.0016	0.0015	0.0014	0.6262	0.7823	0.8591	0.8855
1	1 vuelta	60	7998	40	5332	33	4398.9	31	4132.3	19	15.58	0.0012	0.4779	20912.6274	0.0020	0.0016	0.0015	0.0014	0.6205	0.7600	0.8367	0.8633
2	1 vuelta	60	7998	40	5332	33	4398.9	31	4132.3	19	15.2	0.0013	0.4899	21435.4431	0.0020	0.0016	0.0015	0.0014	0.6361	0.7790	0.8577	0.8849
3	1 vuelta	60	7998	40	5332	33	4398.9	31	4132.3	19	15.41	0.0012	0.4832	21143.3313	0.0020	0.0016	0.0015	0.0014	0.6274	0.7684	0.8460	0.8728
4	1 vuelta	60	7998	40	5332	33	4398.9	31	4132.3	19	15.49	0.0012	0.4807	21034.1339	0.0020	0.0016	0.0015	0.0014	0.6242	0.7644	0.8416	0.8683
5	1 vuelta	60	7998	40	5332	33	4398.9	31	4132.3	19	15.46	0.0012	0.4816	21074.9505	0.0020	0.0016	0.0015	0.0014	0.6254	0.7659	0.8432	0.8700
6	1 vuelta	60	7998	40	5332	32	4265.6	31	4132.3	19	15.76	0.0012	0.4725	20673.7776	0.0020	0.0016	0.0014	0.0014	0.6135	0.7513	0.8400	0.8535
7	1 vuelta	60	7998	40	5332	34	4532.2	31	4132.3	19	15.78	0.0012	0.4719	20647.5751	0.0020							

1	1 1/3 vuelta	84	11197.2	56	7464.8	46	6131.8	42	5598.6	19	12.8	0.0015	0.5817	25454.5887	0.0023	0.0019	0.0017	0.0016	0.6384	0.7818	0.8626	0.9028
2	1 1/3 vuelta	86	11463.8	57	7598.1	46	6131.8	45	5998.5	19	12.39	0.0015	0.6010	26296.9116	0.0024	0.0019	0.0017	0.0017	0.6518	0.8006	0.8912	0.9010
3	1 1/3 vuelta	86	11463.8	57	7598.1	47	6265.1	45	5998.5	19	12.13	0.0016	0.6138	26860.5717	0.0024	0.0019	0.0017	0.0017	0.6657	0.8178	0.9006	0.9203
4	1 1/3 vuelta	85	11330.5	57	7598.1	46	6131.8	44	5865.2	19	12.59	0.0015	0.5914	25879.1688	0.0023	0.0019	0.0017	0.0017	0.6452	0.7879	0.8770	0.8967
5	1 1/3 vuelta	85	11330.5	57	7598.1	45	5998.5	43	5731.9	19	12.95	0.0015	0.5750	25159.7479	0.0023	0.0019	0.0017	0.0017	0.6272	0.7660	0.8621	0.8819
6	1 1/3 vuelta	86	11463.8	56	7464.8	46	6131.8	44	5865.2	19	12.97	0.0015	0.5741	25120.9510	0.0024	0.0019	0.0017	0.0017	0.6226	0.7716	0.8513	0.8705
7	1 1/3 vuelta	84	11197.2	56	7464.8	45	5998.5	42	5598.6	19	12.99	0.0015	0.5732	25082.2737	0.0023	0.0019	0.0017	0.0016	0.6290	0.7704	0.8594	0.8896
8	1 1/3 vuelta	84	11197.2	55	7331.5	44	5865.2	43	5731.9	19	13.28	0.0014	0.5607	24534.5433	0.0023	0.0019	0.0017	0.0017	0.6153	0.7604	0.8501	0.8600
9	1 1/3 vuelta	82	10930.6	54	7198.2	45	5998.5	43	5731.9	19	13.02	0.0015	0.5719	25024.4804	0.0023	0.0019	0.0017	0.0017	0.6352	0.7827	0.8574	0.8771
1	1 1/3 vuelta	116	15462.8	74	9864.2	63	8397.9	58	7731.4	19	10.82	0.0018	0.6882	30112.6372	0.0027	0.0022	0.0020	0.0019	0.6426	0.8046	0.8720	0.9088
2	1 1/3 vuelta	116	15462.8	71	9464.3	62	8264.6	58	7731.4	19	11.4	0.0017	0.6531	28580.5908	0.0027	0.0021	0.0020	0.0019	0.6099	0.7796	0.8343	0.8626
3	1 1/3 vuelta	116	15462.8	73	9730.9	63	8397.9	58	7731.4	19	11.15	0.0017	0.6678	29221.4112	0.0027	0.0022	0.0020	0.0019	0.6236	0.7961	0.8462	0.8819
4	1 1/3 vuelta	116	15462.8	74	9864.2	63	8397.9	58	7731.4	19	11.29	0.0017	0.6595	28859.0553	0.0027	0.0022	0.0020	0.0019	0.6159	0.7711	0.8357	0.8710
5	1 1/3 vuelta	116	15462.8	74	9864.2	62	8264.6	58	7731.4	19	11.05	0.0017	0.6738	29485.6584	0.0027	0.0022	0.0020	0.0019	0.6293	0.7878	0.8607	0.8899
6	1 1/3 vuelta	116	15462.8	74	9864.2	64	8531.2	58	7731.4	19	11.03	0.0017	0.6751	29539.3232	0.0027	0.0022	0.0020	0.0019	0.6304	0.7893	0.8487	0.8915
7	1 1/3 vuelta	116	15462.8	74	9864.2	64	8531.2	58	7731.4	19	11.2	0.0017	0.6648	29090.9585	0.0027	0.0022	0.0020	0.0019	0.6208	0.7773	0.8358	0.8780
8	1 1/3 vuelta	116	15462.8	74	9864.2	63	8397.9	58	7731.4	19	11.14	0.0017	0.6684	29247.6423	0.0027	0.0022	0.0020	0.0019	0.6242	0.7815	0.8470	0.8827
9	1 1/3 vuelta	115	15329.5	74	9864.2	62	8264.6	58	7731.4	19	11.24	0.0017	0.6624	28987.4319	0.0027	0.0022	0.0020	0.0019	0.6213	0.7745	0.8462	0.8749
1	1 1/3 vuelta	93	12396.9	66	8797.8	52	6931.6	48	6398.4	19	11.87	0.0016	0.6273	27448.9246	0.0024	0.0021	0.0018	0.0018	0.6542	0.7766	0.8749	0.9106
2	1 1/3 vuelta	92	12263.6	62	8264.6	51	6798.3	48	6398.4	19	12.11	0.0016	0.6149	26904.9327	0.0024	0.0020	0.0018	0.0018	0.6447	0.7854	0.8659	0.8926
3	1 1/3 vuelta	91	12130.3	62	8264.6	52	6931.6	48	6398.4	19	12.17	0.0016	0.6118	26772.2872	0.0024	0.0020	0.0018	0.0018	0.6451	0.7815	0.8533	0.8882
4	1 1/3 vuelta	89	11863.7	62	8264.6	52	6931.6	48	6398.4	19	11.83	0.0016	0.6294	27541.7358	0.0024	0.0020	0.0018	0.0018	0.6710	0.8040	0.8779	0.9137
5	1 1/3 vuelta	87	11597.1	63	8397.9	51	6798.3	48	6398.4	19	12	0.0016	0.6205	27151.5612	0.0024	0.0020	0.0018	0.0018	0.6691	0.7863	0.8739	0.9008
6	1 1/3 vuelta	86	11463.8	62	8264.6	51	6798.3	48	6398.4	19	12.13	0.0016	0.6138	26860.5717	0.0024	0.0020	0.0018	0.0018	0.6657	0.7841	0.8645	0.8911
7	1 1/3 vuelta	85	11330.5	61	8131.3	52	6931.6	48	6398.4	19	11.58	0.0016	0.6430	28136.3329	0.0023	0.0020	0.0018	0.0018	0.7015	0.8280	0.8968	0.9334
8	1 1/3 vuelta	84	11197.2	62	8264.6	52	6931.6	48	6398.4	19	11.79	0.0016	0.6315	27635.1768	0.0023	0.0020	0.0018	0.0018	0.6931	0.8067	0.8809	0.9168
9	1 1/3 vuelta	83	11063.9	61	8131.3	52	6931.6	49	6531.7	19	11.84	0.0016	0.6289	27518.4742	0.0023	0.0020	0.0018	0.0018	0.6943	0.8098	0.8771	0.9036
1	2 vueltas	240	31992	156	20794.8	132	17595.6	123	16395.9	19	7	0.0027	1.0637	46545.5335	0.0039	0.0032	0.0029	0.0028	0.6906	0.8566	0.9312	0.9646
2	2 vueltas	239	31858.7	155	20661.5	134	17862.2	123	16395.9	19	7	0.0027	1.0637	46545.5335	0.0039	0.0032	0.0029	0.0028	0.6920	0.8593	0.9242	0.9646
3	2 vueltas	238	31725.4	155	20661.5	130	17329	121	16129.3	19	7.38	0.0026	1.0089	44148.8901	0.0039	0.0032	0.0029	0.0028	0.6578	0.8151	0.8900	0.9225
4	2 vueltas	237	31592.1	151	20128.3	130	17329	121	16129.3	19	7.27	0.0026	1.0242	44816.8824	0.0039	0.0031	0.0029	0.0028	0.6691	0.8383	0.9035	0.9365
5	2 vueltas	238	31725.4	153	20394.9	130	17329	121	16129.3	19	6.64	0.0029	1.1214	49069.0966	0.0039	0.0031	0.0029	0.0028	0.7311	0.9118	0.9892	1.0253
6	2 vueltas	238	31725.4	153	20394.9	130	17329	121	16129.3	19	7.35	0.0026	1.0130	44329.0796	0.0039	0.0031	0.0029	0.0028	0.6605	0.8237	0.8936	0.9263
7	2 vueltas	237	31592.1	151	20128.3	131	17462.3	120	15996	19	7.1	0.0027	1.0487	45889.9626	0.0039	0.0031	0.0029	0.0028	0.6852	0.8584	0.9216	0.9629
8	2 vueltas	236	31458.8	152	20261.6	129	17195.7	120	15996	19	6.85	0.0028	1.0870	47564.7788	0.0039	0.0031	0.0029	0.0028	0.7117	0.8968	0.9626	0.9980
9	2 vueltas	236	31458.8	151	20128.3	128	17062.4	120	15996	19	7.24	0.0026	1.0284	45002.5877	0.0039	0.0031	0.0029	0.0028	0.6733	0.8418	0.9143	0.9443
1	2 vueltas	236	31458.8	155	20661.5	131	17462.3	120	15996	19	7.1	0.0027	1.0487	45889.9626	0.0039	0.0032	0.0029	0.0028	0.6866	0.8472	0.9216	0.9629
2	2 vueltas	240	31992	155	20661.5	131	17462.3	121	16129.3	19	7.69	0.0025	0.9683	42369.1463	0.0039	0.0032	0.0029	0.0028	0.6286	0.7822	0.8509	0.8853
3	2 vueltas	238	31725.4	154	20528.2	130	17329	120	15996	19	7.29	0.0026	1.0214	44693.9280	0.0039	0.0031	0.0029	0.0028	0.6659	0.8278	0.9010	0.9378
4	2 vueltas	240	31992	155	20661.5	131	17462.3	120	15996	19	7.48	0.0025	0.9954	43558.6544	0.0039	0.0032	0.0029	0.0028	0.6463	0.8042	0.8747	0.9140
5	2 vueltas	238	31725.4	154	20528.2	130	17329	119	15862.7	19	7.49	0.0025	0.9941	43500.4986	0.0039	0.0031	0.0029	0.0028	0.6481	0.8057	0.8769	0.9166
6	2 vueltas	238	31725.4	154	20528.2	130	17329	119	15862.7	19	7.62	0.0025	0.9771	42758.3641	0.0039	0.0031	0.0029	0.0028	0.6371	0.7920	0.8620	0.9009
7	2 vueltas	235	31325.5	156	20794.8	130	17329	120	15996	19	7.49	0.0025	0.9941	43500.4986	0.0039	0.0032	0.0029	0.0028	0.6522	0.8005	0.8769	0.9127
8	2 vueltas	236	31458.8	152	20261.6	129	17195.7	119	15862.7	19	7.55	0.0025	0.9862	43154.7993	0.0039	0.0031	0.0029	0.0028	0.6457	0.8045	0.8733	0.9093
9	2 vueltas	236	31458.8	151	20128.3	129	17195.7	118	15729.4	19	7.52	0.0025	0.9901	43326.9594	0.0039	0.0031	0.0029	0.0028	0.6483	0.8104	0.8768	0.9168
1	2 vueltas	227	30259.1	145	19328.5	123	16395.9	115	15329.5	19	7.96	0.0024	0.9354	40932.0019	0.0038	0.0031	0.0028	0.0027	0.6244	0.7813	0.8483	0.8773
2	2 vueltas	230	30659	144	19195.2	123	16395.9	115	15329.5	19	7.91	0.0024	0.9413	41190.7376	0.0038	0.0030	0.0028	0.0027	0.6243	0.7890	0.8537	0.8829
3	2 vueltas	228	30392.4	149	19861.7	126	16795.8	116	15462.8	19	7.4	0.0026	1.0062	44029.5588	0.0038	0.0031	0.0028	0.0027	0.6702	0.8291	0.9016	0.9396
4	2 vueltas	226	30125.8	147	19595.1	125	16662.5	116	15462.8	19	7.8	0.0024	0.9546	41771.6327	0.0038	0.0031	0.0028	0.0027	0.6387	0.7919	0.8588	0.8914
5	2 vueltas	227	30259.1	147	19595.1	125	16662.5	116	15462.8	19	7.83	0.0024	0.9509	41611.5881	0.0038	0.0031	0.0028	0.0027	0.6348	0.7889	0.8555	0.8880
6	2 vueltas	225	29992.5	145	19328.5	123	16395.9	116	15462.8	19	7.63	0.0025	0.9759	42702.3243	0.0038	0.0031	0.0028	0.0027	0.6543	0.8151	0.8850	0.9113
7	2 vueltas	226	30125.8	147	19595.1	125	16662.5	115	15329.5	19	7.77	0.0024	0.9583	41932.9131	0.0038	0.0031	0.0028	0.0027	0.6411	0.7949	0.8621	0.8

1	3 vueltas	265	35324.5	167	22261.1	141	18795.3	132	17595.6	19	6.24	0.0030	1.1932	52214.5408	0.0041	0.0033	0.0030	0.0029	0.7372	0.9287	1.0107	1.0446
2	3 vueltas	262	34924.6	168	22394.4	143	19061.9	132	17595.6	19	6.59	0.0029	1.1299	49441.3862	0.0041	0.0033	0.0030	0.0029	0.7021	0.8768	0.9503	0.9891
3	3 vueltas	265	35324.5	168	22394.4	141	18795.3	133	17728.9	19	6.84	0.0028	1.0886	47634.3180	0.0041	0.0033	0.0030	0.0029	0.6726	0.8447	0.9220	0.9484
4	3 vueltas	262	34924.6	162	21594.6	143	19061.9	132	17595.6	19	6.78	0.0028	1.0982	48055.8606	0.0041	0.0032	0.0030	0.0029	0.6824	0.8678	0.9237	0.9614
5	3 vueltas	261	34791.3	165	21994.5	143	19061.9	132	17595.6	19	6.23	0.0030	1.1952	52298.3523	0.0041	0.0033	0.0030	0.0029	0.7441	0.9358	1.0052	1.0463
6	3 vueltas	262	34924.6	163	21727.9	142	18928.6	132	17595.6	19	6.52	0.0029	1.1420	49972.1986	0.0041	0.0032	0.0030	0.0029	0.7096	0.8997	0.9639	0.9997
7	3 vueltas	263	35057.9	164	21861.2	142	18928.6	130	17329	19	6.89	0.0028	1.0807	47288.6408	0.0041	0.0032	0.0030	0.0029	0.6702	0.8487	0.9121	0.9533
8	3 vueltas	262	34924.6	164	21861.2	142	18928.6	133	17728.9	19	6.77	0.0028	1.0998	48126.8441	0.0041	0.0032	0.0030	0.0029	0.6834	0.8638	0.9263	0.9592
9	3 vueltas	266	35457.8	166	22127.8	140	18662	132	17595.6	19	6.83	0.0028	1.0902	47704.0607	0.0041	0.0033	0.0030	0.0029	0.6723	0.8510	0.9267	0.9544
1	3 vueltas	273	36390.9	171	22794.3	146	19461.8	136	18128.8	19	6.54	0.0029	1.1385	49819.3784	0.0042	0.0033	0.0031	0.0030	0.6930	0.8757	0.9477	0.9819
2	3 vueltas	271	36124.3	171	22794.3	147	19595.1	136	18128.8	19	6.44	0.0030	1.1562	50592.9712	0.0042	0.0033	0.0031	0.0030	0.7064	0.8893	0.9591	0.9972
3	3 vueltas	269	35857.7	169	22527.7	145	19328.5	137	18262.1	19	6.62	0.0029	1.1248	49217.3315	0.0042	0.0033	0.0031	0.0030	0.6897	0.8702	0.9395	0.9665
4	3 vueltas	265	35324.5	169	22527.7	146	19461.8	133	17728.9	19	6.45	0.0029	1.1544	50514.5325	0.0041	0.0033	0.0031	0.0029	0.7132	0.8931	0.9609	1.0068
5	3 vueltas	264	35191.2	170	22661.144	144	19195.2	136	18128.8	19	6.42	0.0030	1.1598	50750.5817	0.0041	0.0033	0.0030	0.0030	0.7179	0.8947	0.9721	1.0003
6	3 vueltas	265	35324.5	169	22527.7	145	19328.5	136	18128.8	19	6.71	0.0028	1.1097	48557.1885	0.0041	0.0033	0.0031	0.0030	0.6856	0.8585	0.9269	0.9570
7	3 vueltas	266	35457.8	168	22394.4	144	19195.2	134	17862.2	19	6.88	0.0028	1.0822	47357.3742	0.0041	0.0033	0.0030	0.0029	0.6674	0.8398	0.9071	0.9403
8	3 vueltas	263	35057.9	168	22394.4	144	19195.2	134	17862.2	19	6.77	0.0028	1.0998	48126.8441	0.0041	0.0033	0.0030	0.0029	0.6821	0.8534	0.9218	0.9556
9	3 vueltas	265	35324.5	168	22394.4	144	19195.2	133	17728.9	19	6.69	0.0028	1.1190	48702.3520	0.0041	0.0033	0.0030	0.0029	0.6877	0.8637	0.9328	0.9707
1	3 vueltas	249	33191.7	170	22661.1	145	19328.5	134	17862.2	19	6.67	0.0028	1.1163	48848.3860	0.0040	0.0033	0.0031	0.0029	0.7115	0.8611	0.9324	0.9699
2	3 vueltas	254	33858.2	168	22394.4	144	19195.2	132	17595.6	19	6.77	0.0028	1.0998	48126.8441	0.0040	0.0033	0.0030	0.0029	0.6941	0.8534	0.9218	0.9628
3	3 vueltas	260	34658	168	22394.4	143	19061.9	132	17595.6	19	7.1	0.0027	1.0487	45889.9626	0.0041	0.0033	0.0030	0.0029	0.6541	0.8138	0.8820	0.9181
4	3 vueltas	260	34658	168	22394.4	144	19195.2	132	17595.6	19	6.65	0.0029	1.1190	48995.2985	0.0041	0.0033	0.0030	0.0029	0.6984	0.8688	0.9385	0.9802
5	3 vueltas	260	34658	168	22394.4	145	19328.5	132	17595.6	19	6.84	0.0028	1.0886	47634.3180	0.0041	0.0033	0.0031	0.0029	0.6790	0.8447	0.9092	0.9530
6	3 vueltas	262	34924.6	166	22127.8	142	18928.6	133	17728.9	19	6.96	0.0027	1.0698	46813.0366	0.0041	0.0033	0.0030	0.0029	0.6648	0.8351	0.9030	0.9330
7	3 vueltas	262	34924.6	165	21994.5	143	19061.9	133	17728.9	19	7	0.0027	1.0637	46545.5335	0.0041	0.0033	0.0030	0.0029	0.6610	0.8329	0.8946	0.9277
8	3 vueltas	260	34658	167	22261.1	143	19061.9	132	17595.6	19	7.14	0.0027	1.0428	45632.8760	0.0041	0.0033	0.0030	0.0029	0.6505	0.8116	0.8771	0.9129
9	3 vueltas	260	34658	166	22127.8	145	19328.5	132	17595.6	19	6.98	0.0027	1.0667	46678.9018	0.0041	0.0033	0.0031	0.0029	0.6654	0.8327	0.8910	0.9338
1	TA	277	36924.1	180	23994	159	21194.7	141	18795.3	19	6.54	0.0029	1.1385	49819.3784	0.0042	0.0034	0.0032	0.0030	0.6880	0.8535	0.9081	0.9643
2	TA	280	37324	178	23727.4	155	20661.5	143	19061.9	19	7.89	0.0024	0.9437	41295.1502	0.0042	0.0034	0.0032	0.0030	0.5672	0.7114	0.7624	0.7937
3	TA	280	37324	175	23327.5	147	19595.1	140	18662	19	6.55	0.0029	1.1368	49743.3183	0.0042	0.0034	0.0031	0.0030	0.6833	0.8643	0.9430	0.9663
4	TA	279	37190.7	175	23327.5	153	20394.9	143	19061.9	19	6.54	0.0029	1.1385	49819.3784	0.0042	0.0034	0.0031	0.0030	0.6855	0.8656	0.9258	0.9576
5	TA	279	37190.7	176	23460.8	151	20128.3	136	18128.8	19	6.61	0.0029	1.1265	49291.7904	0.0042	0.0034	0.0031	0.0030	0.6783	0.8540	0.9220	0.9715
6	TA	278	37057.4	172	22927.6	149	19861.7	137	18262.1	19	5.84	0.0033	1.2750	55790.8792	0.0042	0.0033	0.0031	0.0030	0.7691	0.9778	1.0505	1.0856
7	TA	277	36924.1	174	23194.2	147	19595.1	138	18395.4	19	6.63	0.0029	1.1231	49143.0973	0.0042	0.0033	0.0031	0.0030	0.6787	0.8563	0.9316	0.9615
8	TA	278	37057.4	172	22927.6	147	19595.1	138	18395.4	19	6.85	0.0028	1.0870	47564.7788	0.0042	0.0033	0.0031	0.0030	0.6557	0.8336	0.9017	0.9307
9	TA	275	36657.5	172	22927.6	143	19061.9	137	18262.1	19	6.74	0.0028	1.1047	48341.0586	0.0042	0.0033	0.0030	0.0030	0.6700	0.8472	0.9292	0.9493
1	TA	271	36124.3	172	22927.6	148	19728.4	136	18128.8	19	6.68	0.0028	1.1146	48775.2597	0.0042	0.0033	0.0031	0.0030	0.6810	0.8548	0.9215	0.9613
2	TA	271	36124.3	169	22527.7	149	19861.7	136	18128.8	19	6.76	0.0028	1.1015	48198.0377	0.0042	0.0033	0.0031	0.0030	0.6730	0.8522	0.9076	0.9500
3	TA	265	35324.5	173	23060.9	148	19728.4	138	18395.4	19	6.68	0.0028	1.1146	48775.2597	0.0041	0.0033	0.0031	0.0030	0.6887	0.8524	0.9215	0.9543
4	TA	269	35857.7	171	22794.3	147	19595.1	136	18128.8	19	6.71	0.0028	1.1097	48557.1885	0.0042	0.0033	0.0031	0.0030	0.6805	0.8535	0.9205	0.9570
5	TA	270	35991	173	23060.9	148	19728.4	135	17995.5	19	6.79	0.0028	1.0966	47985.0861	0.0042	0.0033	0.0031	0.0029	0.6712	0.8385	0.9066	0.9493
6	TA	270	35991	173	23060.9	146	19461.8	136	18128.8	19	6.47	0.0029	1.1508	50358.3825	0.0042	0.0033	0.0031	0.0030	0.7044	0.8800	0.9579	0.9925
7	TA	270	35991	173	23060.9	147	19595.1	135	17995.5	19	6.54	0.0029	1.1385	49819.3784	0.0042	0.0033	0.0031	0.0029	0.6969	0.8706	0.9445	0.9855
8	TA	268	35724.4	174	23194.2	146	19461.8	136	18128.8	19	6.63	0.0029	1.1231	49143.0973	0.0042	0.0033	0.0031	0.0030	0.6900	0.8563	0.9348	0.9686
9	TA	269	35857.7	172	22927.6	145	19328.5	135	17995.5	19	6.75	0.0028	1.1031	48269.4422	0.0042	0.0033	0.0031	0.0029	0.6765	0.8460	0.9214	0.9549
1	TA	273	36390.9	173	23060.9	150	19995	137	18262.1	19	7.04	0.0027	1.0576	46281.0703	0.0042	0.0033	0.0031	0.0030	0.6438	0.8088	0.8686	0.9088
2	TA	270	35991	174	23194.2	150	19995	137	18262.1	19	6.76	0.0028	1.1015	48198.0377	0.0042	0.0033	0.0031	0.0030	0.6742	0.8398	0.9045	0.9465
3	TA	275	36657.5	175	23327.5	150	19995	138	18395.4	19	7	0.0027	1.0637	46545.5335	0.0042	0.0034	0.0031	0.0030	0.6451	0.8087	0.8735	0.9107
4	TA	275	36657.5	175	23327.5	150	19995	138	18395.4	19	6.92	0.0027	1.0760	47083.6322	0.0042	0.0034	0.0031	0.0030	0.6526	0.8181	0.8836	0.9212
5	TA	269	35857.7	174	23194.2	149	19861.7	137	18262.1	19	7.03	0.0027	1.0592	46346.9040	0.0042	0.0033	0.0031	0.0030	0.6495	0.8076	0.8727	0.9101
6	TA	271	36124.3	173	23060.9	148	19728.4	137	18262.1	19	7.17	0.0026	1.0385	45441.9435	0.0042	0.0033	0.0031	0.0030	0.6345	0.7941	0.8586	0.8924
7	TA	268	35724.4	173	23060.9	149	19861.7	136	18128.8	19	6.93	0.0027	1.0744	47015.6904	0.0042	0.0033	0.0031	0.0030	0.6			

Tabla C.4 Resultados experimentales obtenidos con la placa de orificio 4

Posición de la válvula	$\Delta P$ (mmHg)	$\Delta P$ (Pa)	Volumen (l)	Tiempo (s)	Flujo Real (m <sup>3</sup> /s)	Vel (m/s)	Re	Flujo $\Delta P0$ (m <sup>3</sup> /s)	Flujo $\Delta P1$ (m <sup>3</sup> /s)	Flujo $\Delta P2$ (m <sup>3</sup> /s)	Flujo $\Delta P3$ (m <sup>3</sup> /s)	CD 0	CD 1	CD 2	CD 3							
1	5/6 vuelta	45	5998.5	35	4665.5	29	3865.7	28	3732.4	19	18.42	0.0010	0.4042	17688.3135	0.0017	0.0015	0.0014	0.0013	0.6061	0.6872	0.7550	0.7683
2	5/6 vuelta	45	5998.5	36	4798.8	29	3865.7	29	3865.7	19	17.9	0.0011	0.4160	18202.1640	0.0017	0.0015	0.0014	0.0014	0.6237	0.6973	0.7769	0.7769
3	5/6 vuelta	45	5998.5	36	4798.8	29	3865.7	29	3865.7	19	17.96	0.0011	0.4146	18141.3549	0.0017	0.0015	0.0014	0.0014	0.6216	0.6950	0.7743	0.7743
4	5/6 vuelta	45	5998.5	36	4798.8	29	3865.7	28	3732.4	19	18.39	0.0010	0.4049	17717.1688	0.0017	0.0015	0.0014	0.0013	0.6071	0.6787	0.7562	0.7696
5	5/6 vuelta	45	5998.5	36	4798.8	29	3865.7	28	3732.4	19	18.32	0.0010	0.4064	17784.8654	0.0017	0.0015	0.0014	0.0013	0.6094	0.6813	0.7591	0.7725
6	5/6 vuelta	45	5998.5	36	4798.8	29	3865.7	28	3732.4	19	18.56	0.0010	0.4012	17554.8887	0.0017	0.0015	0.0014	0.0013	0.6015	0.6725	0.7493	0.7625
7	5/6 vuelta	45	5998.5	35	4665.5	28	3732.4	28	3732.4	19	17.79	0.0011	0.4185	18314.7125	0.0017	0.0015	0.0013	0.0013	0.6275	0.7116	0.7955	0.7955
8	5/6 vuelta	45	5998.5	35	4665.5	28	3732.4	26	3465.8	19	18.77	0.0010	0.3967	17358.4835	0.0017	0.0015	0.0013	0.0013	0.5948	0.6744	0.7540	0.7825
9	5/6 vuelta	43	5731.9	34	4532.2	28	3732.4	27	3599.1	19	18.18	0.0010	0.4096	17921.8226	0.0017	0.0015	0.0013	0.0013	0.6282	0.7065	0.7785	0.7928
1	5/6 vuelta	43	5731.9	34	4532.2	28	3732.4	25	3332.5	19	18.95	0.0010	0.3929	17193.6008	0.0017	0.0015	0.0013	0.0013	0.6027	0.6778	0.7468	0.7904
2	5/6 vuelta	42	5598.6	32	4265.6	27	3599.1	26	3465.8	19	19.51	0.0010	0.3816	16700.0889	0.0016	0.0014	0.0013	0.0013	0.5923	0.6786	0.7387	0.7528
3	5/6 vuelta	42	5598.6	32	4265.6	26	3465.8	25	3332.5	19	19.25	0.0010	0.3868	16925.6486	0.0016	0.0014	0.0013	0.0013	0.6003	0.6877	0.7630	0.7781
4	5/6 vuelta	41	5465.3	32	4265.6	26	3465.8	26	3465.8	19	19.41	0.0010	0.3836	16786.1275	0.0016	0.0014	0.0013	0.0013	0.6026	0.6821	0.7567	0.7567
5	5/6 vuelta	40	5332	32	4265.6	27	3599.1	24	3199.2	19	19.92	0.0010	0.3738	16356.3622	0.0016	0.0014	0.0013	0.0012	0.5944	0.6646	0.7235	0.7674
6	5/6 vuelta	40	5332	32	4265.6	26	3465.8	24	3199.2	19	19.77	0.0010	0.3766	16480.4621	0.0016	0.0014	0.0013	0.0012	0.5989	0.6696	0.7429	0.7732
7	5/6 vuelta	40	5332	31	4132.3	25	3332.5	25	3332.5	19	19.85	0.0010	0.3751	16414.0421	0.0016	0.0014	0.0013	0.0013	0.5965	0.6776	0.7546	0.7546
8	5/6 vuelta	40	5332	31	4132.3	25	3332.5	24	3199.2	19	20.28	0.0009	0.3672	16066.0126	0.0016	0.0014	0.0013	0.0012	0.5839	0.6632	0.7386	0.7538
9	5/6 vuelta	40	5332	31	4132.3	25	3332.5	24	3199.2	19	19.01	0.0010	0.3617	17139.3338	0.0016	0.0014	0.0013	0.0012	0.6229	0.7075	0.7879	0.8041
1	5/6 vuelta	44	5865.2	34	4532.2	28	3732.4	26	3465.8	19	18.96	0.0010	0.3927	17184.5324	0.0017	0.0015	0.0013	0.0013	0.5955	0.6774	0.7465	0.7746
2	5/6 vuelta	44	5865.2	34	4532.2	28	3732.4	27	3599.1	19	18.77	0.0010	0.3967	17358.4835	0.0017	0.0015	0.0013	0.0013	0.6015	0.6843	0.7540	0.7878
3	5/6 vuelta	44	5865.2	34	4532.2	27	3599.1	27	3599.1	19	17.98	0.0011	0.4141	18121.1755	0.0017	0.0015	0.0013	0.0013	0.6279	0.7143	0.8016	0.8016
4	5/6 vuelta	42	5598.6	34	4532.2	27	3599.1	27	3599.1	19	18.95	0.0010	0.3929	17193.6008	0.0016	0.0015	0.0013	0.0013	0.6098	0.6778	0.7606	0.7606
5	5/6 vuelta	43	5731.9	34	4532.2	27	3599.1	26	3465.8	19	18.72	0.0010	0.3977	17404.8469	0.0017	0.0015	0.0013	0.0013	0.6101	0.6861	0.7699	0.7846
6	5/6 vuelta	43	5731.9	34	4532.2	27	3599.1	26	3465.8	19	19.03	0.0010	0.3913	17121.3208	0.0017	0.0015	0.0013	0.0013	0.6001	0.6749	0.7574	0.7718
7	5/6 vuelta	42	5598.6	34	4532.2	27	3599.1	26	3465.8	19	18.69	0.0010	0.3984	17432.7841	0.0016	0.0015	0.0013	0.0013	0.6183	0.6872	0.7711	0.7858
8	5/6 vuelta	42	5598.6	33	4398.9	27	3599.1	26	3465.8	19	19.43	0.0010	0.3832	16788.8489	0.0016	0.0015	0.0013	0.0013	0.5947	0.6709	0.7418	0.7559
9	5/6 vuelta	44	5865.2	34	4532.2	27	3599.1	26	3465.8	19	18.67	0.0010	0.3988	17451.4587	0.0017	0.0015	0.0013	0.0013	0.6047	0.6879	0.7720	0.7867
1	1 vuelta	57	7598.1	45	5998.5	37	4932.1	35	4665.5	19	16.54	0.0011	0.4502	19698.8352	0.0019	0.0017	0.0015	0.0015	0.5997	0.6750	0.7444	0.7653
2	1 vuelta	57	7598.1	44	5865.2	36	4798.8	34	4532.2	19	16.39	0.0012	0.4543	19679.1174	0.0019	0.0017	0.0015	0.0015	0.6052	0.6888	0.7615	0.7836
3	1 vuelta	56	7464.8	44	5865.2	35	4665.5	34	4532.2	19	16.88	0.0011	0.4411	19302.0577	0.0019	0.0017	0.0015	0.0015	0.5929	0.6688	0.7469	0.7609
4	1 vuelta	56	7464.8	43	5731.9	35	4665.5	33	4398.9	19	16.47	0.0012	0.4521	19782.5583	0.0019	0.0017	0.0015	0.0015	0.6076	0.6934	0.7686	0.7915
5	1 vuelta	55	7331.5	43	5731.9	35	4665.5	33	4398.9	19	17.12	0.0011	0.4349	19031.4682	0.0019	0.0017	0.0015	0.0015	0.5898	0.6671	0.7394	0.7615
6	1 vuelta	54	7198.2	42	5598.6	35	4665.5	32	4265.6	19	16.51	0.0012	0.4510	19734.6296	0.0019	0.0016	0.0015	0.0014	0.6173	0.6999	0.7667	0.8019
7	1 vuelta	54	7198.2	42	5598.6	34	4532.2	32	4265.6	19	16.26	0.0012	0.4579	20038.0526	0.0019	0.0016	0.0015	0.0014	0.6268	0.7107	0.7899	0.8142
8	1 vuelta	54	7198.2	42	5598.6	33	4398.9	33	4398.9	19	16.56	0.0011	0.4496	19675.0444	0.0019	0.0016	0.0015	0.0015	0.6154	0.6978	0.7872	0.7872
9	1 vuelta	50	6665	40	5332	31	4132.3	30	3999	19	18.28	0.0010	0.4073	17823.7820	0.0018	0.0016	0.0014	0.0014	0.5794	0.6478	0.7358	0.7480
1	1 vuelta	65	8664.5	51	6798.3	41	5465.3	38	5065.4	19	14.9	0.0013	0.4997	21867.0292	0.0020	0.0018	0.0016	0.0016	0.6234	0.7038	0.7849	0.8153
2	1 vuelta	65	8664.5	49	6531.7	40	5332	38	5065.4	19	15.35	0.0012	0.4851	21225.9762	0.0020	0.0018	0.0016	0.0016	0.6051	0.6970	0.7714	0.7914
3	1 vuelta	65	8664.5	50	6665	40	5332	38	5065.4	19	14.9	0.0013	0.4997	21867.0292	0.0020	0.0018	0.0016	0.0016	0.6234	0.7108	0.7947	0.8153
4	1 vuelta	60	7998	47	6265.1	38	5065.4	37	4932.1	19	15.73	0.0012	0.4734	20713.2063	0.0020	0.0017	0.0016	0.0015	0.6146	0.6945	0.7723	0.7827
5	1 vuelta	61	8131.3	46	6131.8	38	5065.4	37	4932.1	19	14.88	0.0013	0.5004	21896.4203	0.0020	0.0017	0.0016	0.0015	0.6444	0.7421	0.8164	0.8274
6	1 vuelta	56	7464.8	44	5865.2	34	4532.2	33	4398.9	19	15.73	0.0012	0.4734	20713.2063	0.0019	0.0017	0.0015	0.0015	0.6362	0.7177	0.8165	0.8288
7	1 vuelta	56	7464.8	44	5865.2	34	4532.2	34	4532.2	19	16.28	0.0012	0.4574	20013.4358	0.0019	0.0017	0.0015	0.0015	0.6147	0.6935	0.7869	0.7889
8	1 vuelta	55	7331.5	44	5865.2	34	4532.2	33	4398.9	19	15.79	0.0012	0.4716	20634.4687	0.0019	0.0017	0.0015	0.0015	0.6395	0.7150	0.8134	0.8256
9	1 vuelta	54	7198.2	43	5731.9	34	4532.2	33	4398.9	19	16.55	0.0011	0.4499	19686.9326	0.0019	0.0017	0.0015	0.0015	0.6158	0.6901	0.7760	0.7877
1	1 vuelta	59	7864.7	46	6131.8	36	4798.8	35	4665.5	19	15.97	0.0012	0.4662	20401.9245	0.0019	0.0017	0.0015	0.0015	0.6105	0.6914	0.7816	0.7926
2	1 vuelta	58	7731.4	45	5998.5	36	4798.8	36	4798.8	19	15.94	0.0012	0.4671	20440.3221	0.0019	0.0017	0.0015	0.0015	0.6169	0.7004	0.7830	0.7830
3	1 vuelta	58	7731.4	45	5998.5	36	4798.8	36	4798.8	19	15.85	0.0012	0.4698	20556.3871	0.0019	0.0017	0.0015	0.0015	0.6204	0.7043	0.7875	0.7875
4	1 vuelta	58	7731.4	45	5998.5	37	4932.1	35	4665.5	19	16.3	0.0012	0.4568	19988.8794	0.0019	0.0017	0.0015	0.0015	0.6033	0.6849	0.7553	0.7766
5	1 vuelta	58	7731.4	44	5865.2	36	4798.8	35	4665.5	19	16.27	0.0012	0.4576	20025.7366	0.0019	0.0017	0.0015	0.0015	0.6044	0.6939	0.7671	0.7780
6	1 vuelta	58	7731.4	45	5998.5	36	4798.8	36	4798.8	19	15.96	0.0012	0.4665	20414.7077	0.0019	0.0017	0.0015	0.0015	0.6161	0.6995	0.7821	0.7821
7	1 vuelta	57	7598.1	44	5865.2	36	4798.8	34	4532.													

1	1 1/3 vuelta	110	14683	85	11330.5	69	9197.7	66	8797.8	19	11.55	0.0016	0.6447	28209.4143	0.0027	0.0023	0.0021	0.0021	0.6182	0.7033	0.7806	0.7981
2	1 1/3 vuelta	108	14396.4	82	10930.6	67	8931.1	64	8531.2	19	11.58	0.0016	0.6430	28136.3329	0.0026	0.0023	0.0021	0.0020	0.6223	0.7142	0.7901	0.8084
3	1 1/3 vuelta	107	14263.1	82	10930.6	66	8797.8	64	8531.2	19	11.15	0.0017	0.6678	29221.4112	0.0026	0.0023	0.0021	0.0020	0.6463	0.7417	0.8267	0.8396
4	1 1/3 vuelta	107	14263.1	82	10930.6	66	8797.8	64	8531.2	19	11.62	0.0016	0.6408	28039.4780	0.0026	0.0023	0.0021	0.0020	0.6230	0.7117	0.7933	0.8056
5	1 1/3 vuelta	106	14129.8	82	10930.6	66	8797.8	64	8531.2	19	11.37	0.0017	0.6549	28656.0013	0.0026	0.0023	0.0021	0.0020	0.6397	0.7274	0.8107	0.8233
6	1 1/3 vuelta	106	14129.8	82	10930.6	66	8797.8	64	8531.2	19	11.3	0.0017	0.6589	28833.5164	0.0026	0.0023	0.0021	0.0020	0.6437	0.7319	0.8158	0.8294
7	1 1/3 vuelta	104	13863.2	79	10530.7	64	8531.2	61	8131.3	19	11.73	0.0016	0.6348	27776.5332	0.0026	0.0023	0.0020	0.0020	0.6260	0.7183	0.7981	0.8174
8	1 1/3 vuelta	105	13996.5	80	10664	66	8797.8	62	8264.6	19	11.54	0.0016	0.6452	28233.8562	0.0026	0.0023	0.0021	0.0020	0.6333	0.7256	0.7988	0.8242
9	1 1/3 vuelta	106	14129.8	80	10664	66	8797.8	63	8397.9	19	11.37	0.0017	0.6549	28656.0013	0.0026	0.0023	0.0021	0.0020	0.6397	0.7364	0.8107	0.8298
1	1 1/3 vuelta	120	15996	91	12130.3	75	9997.5	75	9997.5	19	11.23	0.0017	0.6630	29013.2444	0.0028	0.0024	0.0022	0.0022	0.6088	0.6991	0.7700	0.7700
2	1 1/3 vuelta	119	15862.7	90	11997	74	9864.2	74	9864.2	19	11.3	0.0017	0.6589	28833.5164	0.0028	0.0024	0.0022	0.0022	0.6075	0.6986	0.7704	0.7704
3	1 1/3 vuelta	119	15862.7	89	11863.7	73	9730.9	73	9730.9	19	10.98	0.0017	0.6781	29673.8374	0.0028	0.0024	0.0022	0.0022	0.6252	0.7230	0.7983	0.7983
4	1 1/3 vuelta	117	15596.1	89	11863.7	72	9597.6	72	9597.6	19	11.51	0.0017	0.6469	28307.4487	0.0027	0.0024	0.0022	0.0022	0.6015	0.6897	0.7668	0.7668
5	1 1/3 vuelta	95	12663.5	73	9730.9	59	7864.7	59	7864.7	19	12.55	0.0015	0.5933	25961.6522	0.0025	0.0022	0.0019	0.0019	0.6122	0.6984	0.7769	0.7769
6	1 1/3 vuelta	110	14663	83	11063.9	68	9064.4	68	9064.4	19	11.69	0.0016	0.6369	27871.5770	0.0027	0.0023	0.0021	0.0021	0.6108	0.7032	0.7769	0.7769
7	1 1/3 vuelta	113	15062.9	86	11463.8	70	9331	70	9331	19	11.09	0.0017	0.6714	29379.5072	0.0027	0.0024	0.0021	0.0021	0.6353	0.7282	0.8071	0.8071
8	1 1/3 vuelta	92	12263.6	70	9331	55	7331.5	55	7331.5	19	12.97	0.0015	0.5741	25120.9510	0.0024	0.0021	0.0019	0.0019	0.6020	0.6901	0.7786	0.7786
9	1 1/3 vuelta	99	13196.7	75	9997.5	60	7998	60	7998	19	12.27	0.0015	0.6068	26554.0941	0.0025	0.0022	0.0020	0.0020	0.6134	0.7048	0.7880	0.7880
1	1 1/3 vuelta	111	14796.3	86	11463.8	69	9197.7	61	8131.3	19	11.63	0.0016	0.6402	28015.3684	0.0027	0.0024	0.0021	0.0020	0.6112	0.6944	0.7752	0.8245
2	1 1/3 vuelta	111	14796.3	85	11330.5	69	9197.7	64	8531.2	19	11.78	0.0016	0.6321	27658.6362	0.0027	0.0023	0.0021	0.0020	0.6034	0.6895	0.7653	0.7947
3	1 1/3 vuelta	111	14796.3	85	11330.5	68	9064.4	66	8797.8	19	10.94	0.0017	0.6806	29782.3341	0.0027	0.0023	0.0021	0.0021	0.6497	0.7425	0.8301	0.8426
4	1 1/3 vuelta	111	14796.3	84	11197.2	69	9197.7	64	8531.2	19	11.53	0.0016	0.6458	28258.3465	0.0027	0.0023	0.0021	0.0020	0.6165	0.7087	0.7819	0.8119
5	1 1/3 vuelta	107	14263.1	80	10664	67	8931.1	64	8531.2	19	11.74	0.0016	0.6342	27752.8735	0.0026	0.0023	0.0021	0.0020	0.6167	0.7132	0.7793	0.7974
6	1 1/3 vuelta	107	14263.1	81	10797.3	67	8931.1	63	8397.9	19	11.43	0.0017	0.6514	28505.5761	0.0026	0.0023	0.0021	0.0020	0.6334	0.7280	0.8005	0.8255
7	1 1/3 vuelta	109	14529.7	82	10930.6	67	8931.1	63	8397.9	19	11.44	0.0017	0.6509	28480.6586	0.0026	0.0023	0.0021	0.0020	0.6270	0.7229	0.7998	0.8248
8	1 1/3 vuelta	108	14396.4	82	10930.6	67	8931.1	64	8531.2	19	11.59	0.0016	0.6424	28112.0565	0.0026	0.0023	0.0021	0.0020	0.6218	0.7136	0.7894	0.8077
9	1 1/3 vuelta	106	14129.8	80	10664	66	8797.8	64	8531.2	19	11.57	0.0016	0.6435	28160.6512	0.0026	0.0023	0.0021	0.0020	0.6287	0.7237	0.7967	0.8091
1	2 vueltas	244	32525.2	177	23594.1	146	19461.8	140	18662	19	7.9	0.0024	0.9425	41242.8778	0.0040	0.0034	0.0031	0.0030	0.6069	0.7125	0.7845	0.8012
2	2 vueltas	242	32258.6	179	23860.7	146	19461.8	139	18528.7	19	7.78	0.0024	0.9570	41879.0148	0.0039	0.0034	0.0031	0.0030	0.6188	0.7195	0.7966	0.8165
3	2 vueltas	242	32258.6	176	23460.8	143	19061.9	138	18395.4	19	7.81	0.0024	0.9534	41718.1479	0.0039	0.0034	0.0030	0.0030	0.6164	0.7228	0.8019	0.8163
4	2 vueltas	239	31858.7	176	23460.8	143	19061.9	137	18262.1	19	7.59	0.0025	0.9810	42927.3695	0.0039	0.0034	0.0030	0.0030	0.6382	0.7437	0.8251	0.8430
5	2 vueltas	240	31992	177	23594.1	144	19195.2	138	18395.4	19	7.97	0.0024	0.9342	40880.6443	0.0039	0.0034	0.0030	0.0030	0.6065	0.7083	0.7830	0.7999
6	2 vueltas	238	31725.4	175	23327.5	144	19195.2	137	18262.1	19	7.91	0.0024	0.9413	41190.7376	0.0039	0.0034	0.0030	0.0030	0.6137	0.7157	0.7890	0.8089
7	2 vueltas	238	31725.4	174	23194.2	142	18928.6	137	18262.1	19	7.59	0.0025	0.9810	42927.3695	0.0039	0.0033	0.0030	0.0030	0.6396	0.7480	0.8280	0.8430
8	2 vueltas	237	31592.1	175	23327.5	144	19195.2	137	18262.1	19	7.82	0.0024	0.9522	41664.7998	0.0039	0.0034	0.0030	0.0030	0.6221	0.7239	0.7981	0.8162
9	2 vueltas	236	31458.8	174	23194.2	142	18928.6	137	18262.1	19	7.46	0.0025	0.9981	43675.4336	0.0039	0.0033	0.0030	0.0030	0.6535	0.7610	0.8424	0.8577
1	2 vueltas	236	31458.8	172	22927.6	145	19328.5	138	18395.4	19	7.28	0.0026	1.0228	44755.3207	0.0039	0.0033	0.0031	0.0030	0.6696	0.7844	0.8543	0.8757
2	2 vueltas	235	31325.5	175	23327.5	142	18928.6	137	18262.1	19	7.55	0.0025	0.9862	43154.7993	0.0039	0.0034	0.0030	0.0030	0.6471	0.7498	0.8324	0.8474
3	2 vueltas	235	31325.5	172	22927.6	142	18928.6	136	18128.8	19	7.61	0.0025	0.9784	42814.5512	0.0039	0.0033	0.0030	0.0030	0.6419	0.7504	0.8258	0.8438
4	2 vueltas	224	29859.2	166	22127.8	136	18128.8	130	17329	19	7.97	0.0024	0.9342	40880.6443	0.0038	0.0033	0.0030	0.0029	0.6278	0.7293	0.8057	0.8241
5	2 vueltas	221	29459.3	160	21328	132	17595.6	129	17195.7	19	7.88	0.0025	0.9695	42424.3144	0.0038	0.0032	0.0029	0.0029	0.6559	0.7709	0.8487	0.8585
6	2 vueltas	231	30792.3	170	22661	140	18662	133	17728.9	19	7.5	0.0025	0.9928	43442.4980	0.0039	0.0033	0.0030	0.0029	0.6570	0.7658	0.8439	0.8658
7	2 vueltas	230	30659	170	22661	140	18662	134	17862.2	19	7.94	0.0024	0.9378	41035.1051	0.0038	0.0033	0.0030	0.0029	0.6219	0.7234	0.7971	0.8148
8	2 vueltas	225	29992.5	165	21994.5	135	17995.5	129	17195.7	19	8.03	0.0024	0.9273	40575.1849	0.0038	0.0033	0.0029	0.0029	0.6217	0.7260	0.8027	0.8211
9	2 vueltas	223	29725.9	163	21727.9	134	17862.2	130	17329	19	7.89	0.0025	0.9683	42369.1463	0.0038	0.0032	0.0029	0.0029	0.6521	0.7628	0.8413	0.8541
1	2 vueltas	237	31592.1	174	23194.2	143	19061.9	137	18262.1	19	8.19	0.0023	0.9091	39782.5073	0.0039	0.0033	0.0030	0.0030	0.5940	0.6932	0.7647	0.7812
2	2 vueltas	234	31192.2	174	23194.2	141	18795.3	136	18128.8	19	7.96	0.0024	0.9354	40932.0019	0.0039	0.0033	0.0030	0.0030	0.6150	0.7132	0.7923	0.8067
3	2 vueltas	236	31458.8	170	22661	142	18928.6	139	18528.7	19	7.94	0.0024	0.9378	41035.1051	0.0039	0.0033	0.0030	0.0030	0.6140	0.7234	0.7915	0.8000
4	2 vueltas	235	31325.5	168	22394.4	140	18662	137	18262.1	19	7.54	0.0025	0.9875	43212.0338	0.0039	0.0033	0.0030	0.0030	0.6479	0.7663	0.8394	0.8486
5	2 vueltas	235	31325.5	172	22927.6	141	18795.3	136	18128.8	19	7.39	0.0026	1.0076	44089.1387	0.0039	0.0033	0.0030	0.0030	0.6611	0.7727	0.8534	0.8690
6	2 vueltas	235	31325.5	169	22527.7	141	18795.3	134	17862.2	19	7.76	0.0024	0.9595	41986.9504	0.0039	0.0033	0.0030	0.0029	0.6295	0.7424	0.8127	0.8337
7	2 vueltas	235	31325.5	170	22661	139	18528.7	134	17862.2	19	7.55	0.0025	0.9862	43154.7993	0.0039	0.0033	0.0030	0.0029				

1	3 vueltas	272	36257.8	197	26260.1	162	21594.6	155	20661.5	19	7.23	0.0026	1.0299	45064.8319	0.0042	0.0036	0.0032	0.0032	0.6281	0.7380	0.8138	0.8320
2	3 vueltas	267	35591.1	195	25993.5	162	21594.6	154	20528.2	19	7.28	0.0026	1.0228	44755.3207	0.0041	0.0035	0.0032	0.0031	0.6296	0.7367	0.8082	0.8289
3	3 vueltas	267	35591.1	195	25993.5	160	21328	153	20394.9	19	7.12	0.0027	1.0458	45761.0583	0.0041	0.0035	0.0032	0.0031	0.6437	0.7532	0.8315	0.8503
4	3 vueltas	267	35591.1	195	25993.5	159	21194.7	153	20394.9	19	7.17	0.0026	1.0385	45441.9435	0.0041	0.0035	0.0032	0.0031	0.6392	0.7480	0.8283	0.8444
5	3 vueltas	266	35457.8	193	25726.9	159	21194.7	153	20394.9	19	7.11	0.0027	1.0472	45825.4198	0.0041	0.0035	0.0032	0.0031	0.6458	0.7582	0.8353	0.8515
6	3 vueltas	267	35591.1	192	25593.6	158	21061.4	152	20261.6	19	7.1	0.0027	1.0487	45889.9626	0.0041	0.0035	0.0032	0.0031	0.6455	0.7612	0.8391	0.8555
7	3 vueltas	264	35191.2	191	25460.3	159	21194.7	152	20261.6	19	7.44	0.0026	1.0008	43792.8407	0.0041	0.0035	0.0032	0.0031	0.6195	0.7283	0.7983	0.8164
8	3 vueltas	264	35191.2	191	25460.3	157	20928.1	151	20128.3	19	7.43	0.0026	1.0021	43851.7813	0.0041	0.0035	0.0032	0.0031	0.6203	0.7293	0.8044	0.8202
9	3 vueltas	261	34791.3	190	25327	157	20928.1	152	20261.6	19	7.53	0.0025	0.9888	43269.4203	0.0041	0.0035	0.0032	0.0031	0.6156	0.7215	0.7937	0.8067
1	3 vueltas	265	35324.5	195	25993.5	160	21328	153	20394.9	19	7.07	0.0027	1.0532	46084.6867	0.0041	0.0035	0.0032	0.0031	0.6507	0.7585	0.8374	0.8564
2	3 vueltas	260	34658	192	25593.6	158	21061.4	151	20128.3	19	7.27	0.0026	1.0242	44816.8824	0.0041	0.0035	0.0032	0.0031	0.6388	0.7434	0.8195	0.8383
3	3 vueltas	259	34524.7	191	25460.3	157	20928.1	149	19861.7	19	7.63	0.0025	0.9759	42702.3243	0.0041	0.0035	0.0032	0.0031	0.6099	0.7102	0.7833	0.8041
4	3 vueltas	257	34258.1	190	25327	155	20661.5	148	19728.4	19	7.38	0.0026	1.0089	44148.8801	0.0041	0.0035	0.0032	0.0031	0.6330	0.7362	0.8151	0.8341
5	3 vueltas	254	33858.2	187	24927.1	154	20528.2	149	19861.7	19	7.04	0.0027	1.0576	46281.0703	0.0040	0.0035	0.0031	0.0031	0.6675	0.7779	0.8572	0.8715
6	3 vueltas	250	33325	188	25060.4	153	20394.9	148	19728.4	19	7.54	0.0025	0.9875	43212.0338	0.0040	0.0035	0.0031	0.0031	0.6282	0.7244	0.8030	0.8164
7	3 vueltas	255	33991.5	187	24927.1	154	20528.2	148	19728.4	19	7.26	0.0026	1.0256	44878.6136	0.0041	0.0035	0.0031	0.0031	0.6480	0.7543	0.8312	0.8479
8	3 vueltas	256	34124.8	188	25060.4	154	20528.2	147	19595.1	19	6.84	0.0028	1.0886	47634.3180	0.0041	0.0035	0.0031	0.0031	0.6843	0.7985	0.8823	0.9030
9	3 vueltas	255	33991.5	187	24927.1	154	20528.2	148	19728.4	19	6.89	0.0028	1.0807	47288.6408	0.0041	0.0035	0.0031	0.0031	0.6807	0.7948	0.8759	0.8934
1	3 vueltas	265	35324.5	193	25726.9	159	21194.7	155	20661.5	19	7.14	0.0027	1.0428	45632.8760	0.0041	0.0035	0.0032	0.0032	0.6443	0.7550	0.8318	0.8425
2	3 vueltas	263	35057.9	193	25726.9	156	20794.8	152	20261.6	19	7.55	0.0025	0.9862	43154.7993	0.0041	0.0035	0.0032	0.0031	0.6116	0.7140	0.7942	0.8045
3	3 vueltas	259	34524.7	192	25593.6	157	20928.1	152	20261.6	19	7.39	0.0026	1.0076	44089.1387	0.0041	0.0035	0.0032	0.0031	0.6297	0.7313	0.8088	0.8220
4	3 vueltas	263	35057.9	192	25593.6	157	20928.1	152	20261.6	19	7.14	0.0027	1.0428	45632.8760	0.0041	0.0035	0.0032	0.0031	0.6468	0.7570	0.8371	0.8507
5	3 vueltas	261	34791.3	193	25726.9	158	21061.4	151	20128.3	19	7.28	0.0026	1.0228	44755.3207	0.0041	0.0035	0.0032	0.0031	0.6367	0.7405	0.8184	0.8371
6	3 vueltas	261	34791.3	192	25593.6	158	21061.4	152	20261.6	19	6.79	0.0028	1.0966	47985.0861	0.0041	0.0035	0.0032	0.0031	0.6827	0.7960	0.8774	0.8946
7	3 vueltas	260	34658	192	25593.6	156	20794.8	150	19995	19	7.29	0.0026	1.0214	44693.9280	0.0041	0.0035	0.0032	0.0031	0.6371	0.7414	0.8225	0.8388
8	3 vueltas	260	34658	190	25327	156	20794.8	151	20128.3	19	7.3	0.0026	1.0200	44632.7034	0.0041	0.0035	0.0032	0.0031	0.6362	0.7443	0.8214	0.8348
9	3 vueltas	257	34258.1	187	24927.1	155	20661.5	147	19595.1	19	7.52	0.0025	0.9901	43326.9594	0.0041	0.0035	0.0032	0.0031	0.6212	0.7282	0.7999	0.8214
1	TA	275	36657.5	203	27059.9	163	21727.9	159	21194.7	19	7.24	0.0026	1.0284	45002.5877	0.0042	0.0036	0.0032	0.0032	0.6238	0.7260	0.8102	0.8203
2	TA	274	36524.2	203	27059.9	165	21994.5	157	20928.1	19	7.15	0.0027	1.0414	45569.0538	0.0042	0.0036	0.0033	0.0032	0.6328	0.7351	0.8154	0.8359
3	TA	274	36524.2	200	26660	165	21994.5	157	20928.1	19	7.14	0.0027	1.0428	45632.8760	0.0042	0.0036	0.0033	0.0032	0.6336	0.7417	0.8165	0.8371
4	TA	273	36390.9	201	26793.3	166	22127.8	157	20928.1	19	6.98	0.0027	1.0667	46678.9018	0.0042	0.0036	0.0033	0.0032	0.6494	0.7568	0.8327	0.8563
5	TA	273	36390.9	199	26526.7	165	21994.5	157	20928.1	19	7	0.0027	1.0637	46545.5335	0.0042	0.0036	0.0033	0.0032	0.6475	0.7584	0.8329	0.8538
6	TA	272	36257.8	203	27059.9	163	21727.9	157	20928.1	19	6.94	0.0027	1.0729	46947.9445	0.0042	0.0036	0.0032	0.0032	0.6543	0.7574	0.8452	0.8612
7	TA	273	36390.9	202	26926.6	165	21994.5	158	21061.4	19	6.82	0.0028	1.0918	47774.0080	0.0042	0.0036	0.0033	0.0032	0.6646	0.7726	0.8549	0.8736
8	TA	273	36390.9	199	26526.7	164	21861.2	156	20794.8	19	7.14	0.0027	1.0428	45632.8760	0.0042	0.0036	0.0032	0.0032	0.6348	0.7435	0.8190	0.8398
9	TA	273	36390.9	202	26926.6	165	21994.5	157	20928.1	19	7.45	0.0026	0.9994	43734.0594	0.0042	0.0036	0.0033	0.0032	0.6084	0.7073	0.7826	0.8023
1	TA	282	37590.6	208	27726.4	170	22661	162	21594.6	19	6.85	0.0028	1.0870	47564.7788	0.0043	0.0037	0.0033	0.0032	0.6510	0.7580	0.8385	0.8590
2	TA	276	36790.8	213	28392.9	167	22261.1	161	21461.3	19	7.21	0.0026	1.0327	45189.8384	0.0042	0.0037	0.0033	0.0032	0.6252	0.7117	0.8038	0.8186
3	TA	273	36390.9	202	26926.6	164	21861.2	158	21061.4	19	7.07	0.0027	1.0532	46084.6867	0.0042	0.0036	0.0032	0.0032	0.6411	0.7453	0.8271	0.8427
4	TA	271	36124.3	199	26526.7	161	21461.3	156	20794.8	19	7.38	0.0026	1.0089	44148.8801	0.0042	0.0036	0.0032	0.0032	0.6164	0.7193	0.7997	0.8125
5	TA	269	35857.7	199	26526.7	162	21594.6	157	20928.1	19	7.28	0.0026	1.0228	44755.3207	0.0042	0.0036	0.0032	0.0032	0.6272	0.7292	0.8082	0.8210
6	TA	268	35724.4	200	26660	162	21594.6	156	20794.8	19	7.36	0.0026	1.0117	44268.8498	0.0042	0.0036	0.0032	0.0032	0.6215	0.7195	0.7994	0.8147
7	TA	266	35457.8	188	26393.4	161	21461.3	155	20661.5	19	7.15	0.0027	1.0414	45569.0538	0.0041	0.0036	0.0032	0.0032	0.6422	0.7444	0.8255	0.8413
8	TA	267	35591.1	199	26526.7	161	21461.3	155	20661.5	19	7.1	0.0027	1.0487	45889.9626	0.0041	0.0036	0.0032	0.0032	0.6455	0.7477	0.8313	0.8472
9	TA	267	35591.1	198	26393.4	162	21594.6	155	20661.5	19	7.47	0.0025	0.9968	43616.9658	0.0041	0.0036	0.0032	0.0032	0.6135	0.7125	0.7877	0.8053
1	TA	277	36924.1	203	27059.9	166	22127.8	164	21861.2	19	7.27	0.0026	1.0242	44816.8824	0.0042	0.0036	0.0033	0.0032	0.6189	0.7230	0.7995	0.8044
2	TA	274	36524.2	203	27059.9	166	22127.8	159	21194.7	19	7.51	0.0025	0.9915	43384.6518	0.0042	0.0036	0.0033	0.0032	0.6024	0.6999	0.7740	0.7908
3	TA	275	36657.5	202	26926.6	168	22394.4	164	21861.2	19	6.97	0.0027	1.0683	46745.8730	0.0042	0.0036	0.0033	0.0032	0.6479	0.7560	0.8290	0.8390
4	TA	274	36524.2	201	26793.3	164	21861.2	158	21061.4	19	7.15	0.0027	1.0414	45569.0538	0.0042	0.0036	0.0032	0.0032	0.6328	0.7388	0.8179	0.8333
5	TA	274	36524.2	200	26660	164	21861.2	158	21061.4	19	6.94	0.0027	1.0729	46947.9445	0.0042	0.0036	0.0032	0.0032	0.6519	0.7630	0.8426	0.8585
6	TA	273	36390.9	201	26793.3	164	21861.2	157	20928.1	19	7.38	0.0026	1.0089	44148.8801	0.0042	0.0036	0.0032	0.0032	0.6142	0.7158	0.7924	0.8099
7	TA	271	36124.3	200	26660	165	21994.5	158	21061.4	19	7.01	0.0027	1.0622	46479.1348	0.0042	0.0036	0.0033	0.0032</				