

# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

## FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

### MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA UNIÓN DE DOS CONDUCCIONES A PRESIÓN DE DIFERENTE GEOMETRÍA, APLICANDO EL PROGRAMA ANSYS CFX.

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
MENCIÓN HIDRÁULICA.

JENNY FERNANDA CARRERA GALÁRRAGA  
jennyc2010@hotmail.es

DIRECTOR: MSc. ING. EDWIN PATRICIO CASA TIPÁN  
edwin.casa@epn.edu.ec.

Quito, Mayo 2019

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por JENNY FERNANDA CARRERA GALÁRRAGA, bajo mi supervisión.

\_\_\_\_\_  
MSc. ING. EDWIN CASA  
DIRECTOR DEL PROYECTO

## DECLARACIÓN

Yo, Jenny Fernanda Carrera Galárraga, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

\_\_\_\_\_  
JENNY FERNANDA CARRERA GALÁRRAGA

## AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional y a todos los ingenieros que la conforman y que han contribuido en mi desarrollo profesional.

A los miembros del tribunal, la Ing. Ximena Hidalgo, el Ing. Patricio Ortega, el Ing. Pablo Vera por el apoyo y la confianza hacia mi persona.

Un agradecimiento especial a mi tutor de tesis, el Ing. Edwin Casa, por su paciencia, por ayudarme con todos sus conocimientos para culminar con éxito este proyecto de titulación.

A mis padres, en especial a mi madre por su amor, su apoyo y dedicación, a mis hermanas Taty y Andre por darme fuerzas y aliento incluso cuando yo no lo tenía, a mi cuñado y mejor amigo Jaime, por aconsejarme y apoyarme siempre.

A todos mis amigos de carrera, Kathy, Mabe, Lucy, Kary, Jorge, Dennis, Stefania a John Aguirre por alegrarme con sus ocurrencias, a Lizeth Macas, por ser mi mejor amiga y mi confidente.

JENNY C.

## DEDICATORIA

A mi mami Jeanneth por todo su esfuerzo, por anteponer mis necesidades antes que las suyas, por ser mi amiga, por ser mi todo y porque gracias a ella soy todo lo que soy.

A mis hermanas Taty y Andre y a mi sobrino Nicolás, por llegar a alegrarnos la vida. A mi bebé que desde el cielo me acompaña siempre.

JENNY C.

## CONTENIDO

DECLARACIÓN .....	i
CERTIFICACIÓN .....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIA .....	iv
CONTENIDO .....	v
LISTADO DE FIGURAS .....	ix
LISTADO DE TABLAS .....	xvi
LISTADO DE SIMBOLOS PRINCIPALES .....	xxi
RESUMEN .....	xxiii
ABSTRACT .....	xxiv

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	1
INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 ANTECEDENTES .....	1
1.2 GENERALIDADES Y DEFINICIONES DEL FLUJO A PRESIÓN .....	2
1.2.1 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS FLUIDOS.....	2
1.2.2 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN FLUJO A PRESIÓN .....	4
1.2.3 DISTRIBUCIÓN DEL ESFUERZO CORTANTE .....	6
1.2.4 PÉRDIDAS DE ENERGÍA DE UN FLUJO A PRESIÓN.....	8
1.2.4.1 Pérdidas por fricción.....	8
1.2.4.2 Pérdidas de carga localizadas o menores .....	9
1.2.5 DISEÑO CON FLUJO A PRESIÓN.....	13
1.3 OBJETIVO GENERAL .....	14
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
1.5 ALCANCE Y JUSTIFICACIÓN.....	14
1.5.1 ALCANCE .....	14
1.5.2 JUSTIFICACIÓN .....	15
1.5.2.1 Justificación teórica .....	15
1.5.2.2 Justificación metodológica .....	15
1.5.2.3 Justificación práctica.....	16
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	17

BASE TEÓRICA DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS Y ESTADO DEL ARTE.....	17
2.1 INTRODUCCIÓN A LA DINÁMICA DE FLUIDOS CON FLUJO A PRESIÓN.....	17
2.1.1 DEFINICIONES GENERALES .....	17
2.1.1.1 Campo de flujo.....	17
2.1.1.2 Líneas de corriente .....	18
2.1.1.3 Trayectoria.....	19
2.1.1.4 Concepto de la capa límite .....	19
2.1.1.5 Métodos para el análisis y descripción de flujo, Euler y Lagrange.....	26
2.1.2 CLASIFICACIÓN DE FLUIDOS .....	27
2.1.2.1 En función del tiempo .....	27
2.1.2.2 En función del espacio.....	28
2.1.2.3 En función del efecto viscoso .....	28
2.1.2.4 En función de las componentes en el espacio.....	30
2.1.2.5 En función de la velocidad angular.....	30
2.1.2.6 En función a su régimen .....	31
2.2 ECUACIONES FUNDAMENTALES DE LA HIDRÁULICA.....	32
2.2.1 ECUACIÓN GENERAL DE TRANSPORTE.....	32
2.2.2 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD .....	33
2.2.3 ECUACIÓN DE ENERGÍA .....	35
2.2.4 ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO .....	37
2.2.5 ECUACIÓN DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO. NAVIER STOKES .....	38
2.3 INTRODUCCIÓN A LA MODELACIÓN NUMÉRICA.....	39
2.3.1 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD) .....	39
2.3.1.1 Aplicaciones de la dinámica de fluidos computacional .....	40
2.3.1.2 Proceso para la dinámica de fluidos computacional (CFD).....	40
2.3.1.3 Etapas de un análisis CFD .....	43
2.3.1.4 Metodología para la discretización espacial.....	43
2.3.1.5 Clasificación de mallas .....	45
2.3.1.6 Metodología para la discretización temporal .....	48
2.3.1.7 Metodología para la discretización de las ecuaciones.....	49

2.3.1.8 Resolución de las ecuaciones .....	51
2.3.2 BREVE INTRODUCCIÓN SOBRE LA MODELACIÓN DE LA TURBULENCIA: USOS Y RESTRICCIONES.....	52
2.3.2.1 Ecuaciones de Reynolds / Averaged Navier Stokes - (RANS) 52 .....	52
2.3.2.2 Modelos de turbulencia.....	55
2.3.3 PROGRAMA ANSYS .....	59
2.3.3.1 Ansys Workbench.....	60
2.3.3.2 Ansys CFX.....	64
2.3.3.3 Módulos de ejecución de ANSYS.....	65
2.3.4 MÉTODO DE RESOLUCIÓN NUMÉRICA EN ANSYS SECUENCIA Y ESTRUCTURA .....	69
2.3.4.1 Construcción de la geometría .....	69
2.3.4.2 Tipo de análisis a simular .....	69
2.3.4.3 Mallado del dominio de estudio .....	70
2.3.4.4 Parámetros de calidad del mallado.....	72
2.3.4.5 Propiedades del fluido y condiciones de frontera del modelo numérico .....	74
2.3.4.6 Número de courant (CFL).....	76
2.3.4.7 Configuración del control del solver.....	76
2.3.4.8 Resolución numérica .....	77
2.4 ESTADO DEL ARTE .....	<b>Error! Marcador no definido.</b>
2.5 CONCLUSIONES.....	83
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	84
CASO DE APLICACIÓN DEL SOFTWARE ANSYS CFX A LA ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO – TOACHI .....	84
3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS SARAPULLO Y ALLURIQUÍN .....	84
3.1.1 APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO PILATÓN – SARAPULLO .....	84
3.1.2 APROVECHAMIENTO TOACHI – ALLURIQUÍN .....	86
3.2 DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO ESCALA 1:20 DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO – TOACHI .....	88
3.2.1 GENERALIDADES DEL MODELO FÍSICO .....	88
3.2.1.1 Criterios usados para el desarrollo del modelo físico utilizado .....	90
3.2.1.2 Componentes del modelo físico.....	91

3.2.1.3 Plan de pruebas ejecutado.....	95
3.3 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO.....	98
3.3.1 INGRESO DE LA GEOMETRÍA.....	98
3.3.2 MALLADO DEL DOMINIO COMPUTACIONAL.....	99
3.3.3 CONDICIONES DE BORDE DEL MODELO NUMÉRICO.....	99
3.3.4 PARÁMETROS FÍSICOS.....	102
3.3.5 SELECCIÓN DEL MODELO DE TURBULENCIA.....	104
3.4 CALIBRACIÓN DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA CON LOS DATOS EXPERIMENTALES DEL MODELO FÍSICO.....	105
3.4.1 INFLUENCIA DEL MODELO DE TURBULENCIA.....	105
3.4.2 INFLUENCIA DEL TIPO DE MALLADO.....	112
3.5 ESCENARIOS PARA LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.....	125
3.5.1 MODELACIÓN DE LOS ESCENARIOS.....	126
3.6 CONCLUSIONES.....	132
CAPITULO 4.....	134
RESULTADO Y DISCUSIONES.....	134
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>134</b>
4.1 ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS DEL FLUJO.....	134
4.1.1 RESULTADOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES.....	134
4.1.2 RESULTADOS DE CARGAS PIEZOMÉTRICAS.....	137
4.1.3 DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES.....	138
4.2 EVALUACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE PÉRDIDA DE ENERGÍA LOCAL DETERMINADAS PARA LA ESTRUCTURA DE INTERCONEXIÓN DE FLUJOS.....	139
4.3 PATRÓN DE FLUJO EN LA ESTRUCTURA DE INTERCONEXIÓN PARA LOS ESCENARIOS ANALIZADOS.....	152
4.4 VISUALIZACIÓN DEL FLUJO.....	154
4.5 CONCLUSIONES.....	163
<b>CAPITULO 5.....</b>	<b>165</b>
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	165
5.1 CONCLUSIONES.....	165
5.2 RECOMENDACIONES.....	171
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	172
ANEXOS.....	177

<b>FIGURA 2.11:</b> Aparición de contracorrientes.....	25
<b>FIGURA 2.12:</b> Descripción Lagrangiana.....	26
<b>FIGURA 2.13:</b> Descripción Euleriana.....	27
<b>FIGURA 2.14:</b> Diagrama Reológico de fluidos.....	29
<b>FIGURA 2.15:</b> Principio de Conservación de la materia.....	34
<b>FIGURA 2.16:</b> Equilibrio de una partícula en reposo.....	34
<b>FIGURA 2.17:</b> Balance de energía en dos secciones.....	36
<b>FIGURA 2.18:</b> Discretización de variables.....	44
<b>FIGURA 2.19:</b> Índices i, j en una malla estructurada.....	44
<b>FIGURA 2.20:</b> Mallas con nodos centrados en los elementos y en los vértices.....	45
<b>FIGURA 2.21:</b> Mallado Estructurado. Malla de cuadriláteros en 2 – D.....	46
<b>FIGURA 2.22:</b> Malla estructurada. (Malla hexaedros 3 –D).....	46
<b>FIGURA 2.23:</b> Mallado no estructurado. (Tetraedros).....	47
<b>FIGURA 2.24:</b> Mallado estructurado. (Tetraedros y Hexaedros).....	48
<b>FIGURA 2.25:</b> Discretización temporal.....	48
<b>FIGURA 2.26:</b> Proceso para una resolución matemática.....	50
<b>FIGURA 2.27:</b> ANSYS Help.....	60
<b>FIGURA 2.28:</b> Contenido de ANSYS Help.....	60
<b>FIGURA 2.29:</b> ANSYS-CFX.....	61
<b>FIGURA 2.30:</b> Interfaz de ANSYS-Workbench.....	62
<b>FIGURA 2.31:</b> Esquema del Proyecto en ANSYS Workbench.....	63
<b>FIGURA 2.32:</b> Estructura de ANSYS CFX.....	65

## LISTADO DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.1:</b> Distribución de velocidades en una tubería.....	5
<b>FIGURA 1.2:</b> Distribución de velocidades en una tubería con flujo turbulento.....	5
<b>FIGURA 1.3:</b> Distribución de velocidades en una tubería con flujo laminar.....	6
<b>FIGURA 1.4:</b> Distribución de velocidades en una tubería con fluido ideal.....	6
<b>FIGURA 1.5:</b> Gradiente de velocidad de un fluido en movimiento.....	7
<b>FIGURA 1.6:</b> Régimen laminar en un fluido viscoso.....	8
<b>FIGURA 1.7:</b> Esquema de la estructura de unión en base al manual de l'delchik.....	11
<b>FIGURA 1.8:</b> Ábaco de l'delchik para determinar el valor de $kC.S.$ .....	12
<b>FIGURA 1.9:</b> Ábaco de l'delchik para determinar el valor de $KC.St.$ .....	12
<b>FIGURA 2.1:</b> Campo de Flujo.....	17
<b>FIGURA 2.2:</b> Elemento de una línea de corriente.....	18
<b>FIGURA 2.3:</b> Generación de una capa límite.....	20
<b>FIGURA 2.4:</b> Definición del espesor de la capa.....	21
<b>FIGURA 2.5:</b> Espesor de la capa límite.....	21
<b>FIGURA 2.6:</b> Desarrollo de la capa límite.....	22
<b>FIGURA 2.7:</b> Relación entre parámetros adimensionales para el cálculo de la distribución de velocidades.....	22
<b>FIGURA 2.8:</b> Variación del gradiente de presiones.....	24
<b>FIGURA 2.9:</b> Fenómeno de la separación.....	24
<b>FIGURA 2.10:</b> Desarrollo de la capa límite en una expansión.....	25

<b>FIGURA 2.11:</b> Aparición de contracorrientes.....	25
<b>FIGURA 2.12:</b> Descripción Lagrangiana.....	26
<b>FIGURA 2.13:</b> Descripción Euleriana.....	27
<b>FIGURA 2.14:</b> Diagrama Reológico de fluidos.....	29
<b>FIGURA 2.15:</b> Principio de Conservación de la materia.....	34
<b>FIGURA 2.16:</b> Equilibrio de una partícula en reposo.....	34
<b>FIGURA 2.17:</b> Balance de energía en dos secciones.....	36
<b>FIGURA 2.18:</b> Discretización de variables.....	44
<b>FIGURA 2.19:</b> Índices i, j en una malla estructurada.....	44
<b>FIGURA 2.20:</b> Mallas con nodos centrados en los elementos y en los vértices.....	45
<b>FIGURA 2.21:</b> Mallado Estructurado. Malla de cuadriláteros en 2 – D.....	46
<b>FIGURA 2.22:</b> Malla estructurada. (Malla hexaedros 3 –D).....	46
<b>FIGURA 2.23:</b> Mallado no estructurado. (Tetraedros).....	47
<b>FIGURA 2.24:</b> Mallado estructurado. (Tetraedros y Hexaedros).....	48
<b>FIGURA 2.25:</b> Discretización temporal.....	48
<b>FIGURA 2.26:</b> Proceso para una resolución matemática.....	50
<b>FIGURA 2.27:</b> ANSYS Help.....	60
<b>FIGURA 2.28:</b> Contenido de ANSYS Help.....	60
<b>FIGURA 2.29:</b> ANSYS-CFX.....	61
<b>FIGURA 2.30:</b> Interfaz de ANSYS-Workbench.....	62
<b>FIGURA 2.31:</b> Esquema del Proyecto en ANSYS Workbench.....	63
<b>FIGURA 2.32:</b> Estructura de ANSYS CFX.....	65
<b>FIGURA 2.33:</b> Proceso en ANSYS CFX.....	66
<b>FIGURA 2.34:</b> Módulos de ejecución en ANSYS CFX.....	66
<b>FIGURA 2.35:</b> Pre-procesador / SETUP.....	67
<b>FIGURA 2.36:</b> ANSYS CFX- SOLVER.....	68
<b>FIGURA 2.37:</b> ANSYS-CFX POST-PROCESADOR.....	69
<b>FIGURA 2.38:</b> Aspecto radio para triángulos y cuadriláteros.....	73
<b>FIGURA 2.39:</b> Calidad de mallado. Skewness.....	74
<b>FIGURA 2.40:</b> Diagrama de flujo. ANSYS CFX.....	77
<b>FIGURA 2.41:</b> Procedimiento para el monitoreo de la solución.....	78
<b>FIGURA 2.42:</b> Residuales de continuidad y velocidad.....	79
<b>FIGURA 2.43:</b> Residuales de energía cinética turbulenta y disipación turbulenta.....	79
<b>FIGURA 3.1:</b> Planta de la captación del río Pilatón.....	85
<b>FIGURA 3.2:</b> Implementación de la presa Toachi.....	86
<b>FIGURA 3.3:</b> Modelo físico, Estructura de unión Sarapullo- Toachi.....	88
<b>FIGURA 3.4:</b> Modelo físico utilizado en la simulación numérica. (Vista en planta).....	89
<b>FIGURA 3.5:</b> Modelo físico utilizado en la simulación numérica. (Vista Lateral).....	89
<b>FIGURA 3.6:</b> Túnel de descarga Sarapullo. Modelo físico.....	92
<b>FIGURA 3.7:</b> Estructura de Transición Túnel de Descarga Sarapullo – Estructura de Unión.....	92
<b>FIGURA 3.8:</b> Sección Transversal de la Bocatoma del Embalse Toachi.....	92

<b>FIGURA 3.9:</b> Corte Longitudinal de la bocatoma del Embalse Toachi.....	93
<b>FIGURA 3.10:</b> Ubicación de los puntos piezométricos. ....	97
<b>FIGURA 3.11:</b> Estructura de interconexión 3D en SOLIDWORKS. ....	98
<b>FIGURA 3.12:</b> Estructura de interconexión 3D en SpaceClaim. ....	99
<b>FIGURA 3.13:</b> Asignación de nombres a las caras de la geometría. ....	100
<b>FIGURA 3.14:</b> Datos de ingreso para la calibración del modelo. ....	101
<b>FIGURA 3.15:</b> Gráfica de temperatura. ....	102
<b>FIGURA 3.16:</b> Tipo de análisis a simular. ....	103
<b>FIGURA 3.17:</b> Propiedades del fluido. ....	104
<b>FIGURA 3.18:</b> Parámetros físicos. ....	104
<b>FIGURA 3.19:</b> Modelo de Turbulencia K-epsilon RNG, (MT1).....	105
<b>FIGURA 3.20:</b> Modelo de Turbulencia Shear Stress Transport, (MT2).....	106
<b>FIGURA 3.21:</b> Gráfica de residuales, con 10000 iteraciones para el escenario de calibración, (Escenario 1) .....	107
<b>FIGURA 3.22:</b> Gráfica de residuales de la energía cinética turbulenta y disipación turbulenta, con 10000 iteraciones para el escenario de calibración, (Escenario 1).....	107
<b>FIGURA 3.23:</b> Gráfica de residuales para Modelo de Turbulencia MT1. Escenario 1. ....	108
<b>FIGURA 3.24:</b> Gráfica de residuales de la energía cinética turbulenta y disipación turbulenta, Modelo de turbulencia MT1. Escenario 1. ....	108
<b>FIGURA 3.25:</b> Gráficas de convergencia Modelo de turbulencia MT2. Escenario 1. ....	109

<b>FIGURA 4.1:</b> Ubicación de Planos en los puntos de medición de presiones.....	134
<b>FIGURA 4.2:</b> Distribución de velocidades Plano 2. Escenario 1.....	135
<b>FIGURA 4.3:</b> Distribución de velocidades Plano 4. Escenario 1.....	136
<b>FIGURA 4.4:</b> Distribución de velocidades Plano 7. Escenario 1 .....	136
<b>FIGURA 4.5:</b> Distribución de presiones en el eje longitudinal de la Estructura de unión. Escenario 1. ....	138
<b>FIGURA 4.6:</b> Distribución de presiones en el contorno de la Estructura de unión. Escenario 1.....	139
<b>FIGURA 4.7:</b> Esquema de la ubicación del piezómetro 2 y el piezómetro 7.....	141
<b>FIGURA 4.8:</b> Esquema de la ubicación del piezómetro 4 y el piezómetro 7.....	142
<b>FIGURA 4.9:</b> Esquema de la estructura de unión .....	143
<b>FIGURA 4.10:</b> Coeficiente de pérdidas $k_{SG}$ , en función de la relación de caudales $QT/QG$ , a partir de los ábacos de I.E.Idelchik. ....	144
<b>FIGURA 4.11:</b> Coeficiente de pérdidas $k_{TG}$ , en función de la relación de caudales $QT/QG$ , a partir de los ábacos de I.E.Idelchik. ....	146
<b>FIGURA 4.12:</b> Coeficientes de pérdidas $k_{27}$ , a partir de los datos de la simulación numérica, modelo físico y los ábacos de I.E.Idelchik. ....	147
<b>FIGURA 4.13:</b> Coeficientes de pérdidas $k_{47}$ , a partir de los datos de la simulación numérica, modelo físico y los ábacos de I.E.Idelchik. ....	149
<b>FIGURA 4.14:</b> Gráfica del número de Reynolds y el Coeficiente de Pérdida Local $k_{27}$ , para el modelo físico y modelo numérico.....	150

<b>FIGURA 3.26:</b> Gráficas de convergencia de la energía cinética turbulenta y disipación turbulenta. Modelo de turbulencia MT2. Escenario 1.....	109
<b>FIGURA 3.27:</b> Mallado Hexaédrico, (Métodos de Mallado) .....	113
<b>FIGURA 3.28:</b> Mallado Hexaédrico.....	113
<b>FIGURA 3.29:</b> Mallado Hexaédrico – Entrada Sarapullo. ....	114
<b>FIGURA 3.30 :</b> Mallado Hexaédrico – Entrada Toachi e Unión estructura de interconexión .....	114
<b>FIGURA 3.31:</b> Mallado Hexaédrico – Salida de la Galería. ....	115
<b>FIGURA 3.32:</b> Mallado Tetraédrico, (Métodos de Mallado) .....	115
<b>FIGURA 3.33:</b> Mallado Tetraédrico.....	116
<b>FIGURA 3.34:</b> Mallado Tetraédrico – Entrada Sarapullo .....	116
<b>FIGURA 3.35:</b> Mallado Tetraédrico – Entrada Toachi y Unión estructura de interconexión .....	117
<b>FIGURA 3.36:</b> Mallado Tetraédrico – Salida de la Galería. ....	117
<b>FIGURA 3.37:</b> Detalle de la calidad del mallado hexaédrico. ....	120
<b>FIGURA 3.38:</b> Detalle de la calidad del mallado tetraédrico. ....	120
<b>FIGURA 3.39:</b> Elementos de Skewness en el dominio. ....	121
<b>FIGURA 3.40:</b> Elementos de Skewness en el dominio, valores fuera de la calidad del mallado. ....	121
<b>FIGURA 3.41:</b> Gráficas de convergencia Modelo de turbulencia MT3.....	122
<b>FIGURA 3.42:</b> Gráficas de convergencia Modelo de turbulencia MT2.....	123
<b>FIGURA 3.43:</b> Ubicación de puntos piezométricos en el modelo numérico.....	126

<b>FIGURA 4.15:</b> Gráfica del número de Reynolds y el Coeficiente de Pérdida Local $k_{47}$ , para el modelo físico y modelo numérico.....	151
<b>FIGURA 4.16:</b> Vectores velocidad para el escenario 1. Vista en planta. ....	152
<b>FIGURA 4.17:</b> Vectores velocidad para el escenario 1. Vista frontal. ....	153
<b>FIGURA 4.18:</b> Zonas de separación y/o reflujo. Escenario 2.....	154
<b>FIGURA 4.19:</b> Entrada de flujo desde la bocatoma Toachi. ESCENARIO 1. ....	155
<b>FIGURA 4.20:</b> Entrada de flujo desde el túnel de descarga Sarapullo. ESCENARIO 1. ....	155
<b>FIGURA 4.21:</b> Entrada de flujo desde la bocatoma Toachi. ESCENARIO 2. ....	156
<b>FIGURA 4.22:</b> Entrada de flujo desde el túnel de descarga Sarapullo. ESCENARIO 2. ....	156
<b>FIGURA 4.23:</b> Entrada de flujo desde la bocatoma Toachi. ESCENARIO 3. ....	157
<b>FIGURA 4.24:</b> Entrada de flujo desde el túnel de descarga Sarapullo. ESCENARIO 3. ....	157
<b>FIGURA 4.25:</b> Entrada de flujo desde la bocatoma Toachi. ESCENARIO 4. ....	158
<b>FIGURA 4.26:</b> Entrada de flujo desde el túnel de descarga Sarapullo. ESCENARIO 4. ....	158
<b>FIGURA 4.27:</b> Entrada de flujo desde la bocatoma Toachi. ESCENARIO 5. ....	159

<b>FIGURA 4.28:</b> Entrada de flujo desde el túnel de descarga Sarapullo.	
ESCENARIO 5.....	159
<b>FIGURA 4.29:</b> Entrada de flujo desde la bocatoma Toachi.	
ESCENARIO 6.....	160
<b>FIGURA 4.30:</b> Entrada de flujo desde el túnel de descarga Sarapullo.	
ESCENARIO 6.....	160
<b>FIGURA 4.31:</b> Entrada de flujo desde la bocatoma Toachi.	
ESCENARIO 7.....	161
<b>FIGURA 4.32:</b> Entrada de flujo desde el túnel de descarga Sarapullo.	
ESCENARIO 7.....	161
<b>FIGURA 4.33:</b> Entrada de flujo desde la bocatoma Toachi.	
ESCENARIO 8.....	162
<b>FIGURA 4.34:</b> Entrada de flujo desde el túnel de descarga Sarapullo.	
ESCENARIO 8.....	162
<b>FIGURA 4.35:</b> Entrada de flujo desde la bocatoma Toachi.	
ESCENARIO 9.....	163

## LISTADO DE TABLAS

<b>Tabla 1.1:</b> Propiedades mecánicas del agua.....	4
<b>Tabla 2.1</b> Etapas para un análisis CFD.....	43
<b>Tabla 2.2:</b> Resumen de los tipos de discretización.....	51
<b>Tabla 2.3:</b> Calidad del mallado. ORTOGONALIDAD.....	73
<b>Tabla 2.4:</b> Valores de Skewess.....	74
<b>Tabla 3.1:</b> Estructuras Hidráulicas que conforman la Captación del Río Pilatón.....	85
<b>Tabla 3.2:</b> Obras de conducción – Captación Río Pilatón.....	85
<b>Tabla 3.3:</b> Obras de descarga – Captación Río Pilatón.....	86
<b>Tabla 3.4:</b> Estructuras Hidráulicas que conforman la Presa Toachi.....	87
<b>Tabla 3.5:</b> Obras de conducción – Presa Toachi.....	87
<b>Tabla 3.6:</b> Obras de descarga – Presa Toachi.....	87
<b>Tabla 3.7:</b> Características del modelo físico y las magnitudes derivadas.....	93
<b>Tabla 3.8:</b> Dimensiones geométricas del modelo físico.....	94
<b>Tabla 3.9:</b> Plan de pruebas propuesto. Fase 1.....	94
<b>Tabla 3.10:</b> Plan de pruebas propuesto. Fase 2.....	95
<b>Tabla 3.11:</b> Registro de resultados Fase 1 y Fase 2. Cuadro de Caudales obtenidos en el modelo físico, para los diferentes escenarios.....	96
<b>Tabla 3.12:</b> Registro de resultados Fase 1 y Fase 2. Cuadro de Caudales en los diferentes piezómetros.....	97
<b>Tabla 3.13:</b> Datos de ingreso para la calibración del modelo.....	101
<b>Tabla 3.14:</b> Condiciones de contorno en la entrada Toachi.....	101

<b>Tabla 3.15:</b> Condiciones de contorno en la entrada Sarapullo.....	102
<b>Tabla 3.16:</b> Condiciones de contorno en la salida Galería.....	102
<b>Tabla 3.17:</b> Condiciones de contorno en las fronteras sólidas.....	102
<b>Tabla 3.18:</b> Temperatura máxima, mínima y promedio.....	103
<b>Tabla 3.19:</b> Propiedades del fluido. (Agua).....	103
<b>Tabla 3.20:</b> Modelos de turbulencia a simular.....	105
<b>Tabla 3.21:</b> Resultados de la simulación numérica para el modelo de turbulencia MT1. Escenario 1.....	110
<b>Tabla 3.22 :</b> Resultados de la simulación numérica para el modelo de turbulencia MT2. Escenario 1.....	110
<b>Tabla 3.23:</b> Cuadro comparativo de velocidades del flujo para los modelos de turbulencia MT1 y MT2.....	111
<b>Tabla 3.24:</b> Cuadro comparativo de valores de presión para los modelos de turbulencia MT1 y MT2.....	111
<b>Tabla 3.25:</b> Tipos de mallado a simular.....	112
<b>Tabla 3.26:</b> Características del mallado Hexaédrico.....	112
<b>Tabla 3.27:</b> Características del mallado Tetraédrico.....	115
<b>Tabla 3.28:</b> Resultados de la simulación numérica para el modelo de turbulencia MT2.....	123
<b>Tabla 3.29:</b> Cuadro comparativo de velocidades promedio para los modelos de turbulencia MT2 y MT3.....	124
<b>Tabla 3.30:</b> Cuadro comparativo de valores de presión para los modelos de turbulencia MT2 y MT3.....	124

<b>Tabla 3.31:</b> Datos de ingreso para la simulación de todos los escenarios.....	125
<b>Tabla 3.32:</b> Valores de presiones (Pa) para el ESCENARIO 1.....	127
<b>Tabla 3.33:</b> Valores de presiones (Pa) para el ESCENARIO 2.....	127
<b>Tabla 3.34:</b> Valores de presiones (Pa) para el ESCENARIO 3.....	128
<b>Tabla 3.35:</b> Valores de presiones (Pa) para el ESCENARIO 4.....	128
<b>Tabla 3.36:</b> Valores de presiones (Pa) para el ESCENARIO 5.....	129
<b>Tabla 3.37:</b> Valores de presiones (Pa) para el ESCENARIO 6.....	129
<b>Tabla 3.38:</b> Valores de presiones (Pa) para el ESCENARIO 7.....	130
<b>Tabla 3.39:</b> Valores de presiones (Pa) para el ESCENARIO 8.....	130
<b>Tabla 3.40:</b> Valores de presiones (Pa) para el ESCENARIO 9.....	131
<b>Tabla 3.41:</b> Verificación de la continuidad para los diferentes escenarios.....	131
<b>Tabla 4.1:</b> Valores de velocidad promediados en la sección, ubicados en cada piezómetro, para cada escenario.....	137
<b>Tabla 4.2:</b> Resultados del modelo numérico. ANSYS CFX. Valores de carga piezométrica, para cada Escenario.....	138
<b>Tabla 4.3:</b> Resultado del coeficiente de pérdida local ( $k_{27}$ ).....	141
<b>Tabla 4.4:</b> Valores del coeficiente de pérdida local ( $k_{47}$ ).....	142
<b>Tabla 4.5:</b> Coeficiente de pérdidas $k_{SG}$ , en función de la relación de caudales $QT/QG$ , a partir de los ábacos de I.E.I'delchik.....	144
<b>Tabla 4.6:</b> Coeficiente de pérdidas $k_{TG}$ , en función de la relación de caudales $QT/QG$ , y para una relación de áreas igual a 1 a partir de los ábacos de I.E.I'delchik.....	145

<b>Tabla 4.7:</b> Coeficiente de pérdidas $k_{27}$ , en función de la relación de caudales $QT/QG$ , a partir de los datos de la simulación numérica y modelo físico. ....	146
<b>Tabla 4.8:</b> Coeficiente de pérdidas $k_{47}$ , en función de la relación de caudales $QT/QG$ , a partir de los datos de la simulación numérica y modelo físico. ....	148
<b>Tabla 4.9:</b> Número de Reynolds y Coeficiente de Pérdida Local $k_{27}$ , para el modelo físico y modelo numérico. ....	150
<b>Tabla 4.10:</b> Número de Reynolds y el Coeficiente de Pérdida Local $k_{47}$ para el modelo físico y modelo numérico. ....	151

## LISTADO DE SÍMBOLOS PRINCIPALES.

$A$	Área transversal	$m^2$
$D$	Diámetro de la tubería.	$m$
$h_L$	Pérdida de carga local.	$m$
$h_f$	Pérdida por fricción.	$m$
$F$	Fuerza ejercida tangencialmente sobre el área.	$N$
$g$	Gravedad.	$m/s^2$
$K_L$	Coeficiente de pérdidas locales en uniones o accesorios.	
$m$	Masa del cuerpo.	$kg$
$L$	Longitud de la tubería.	$m$
$Q$	Caudal.	$m^3/s$
$QS$	Caudal en la entrada de Sarapullo.	$m^3/s$
$QT$	Caudal en la entrada de Toachi.	$m^3/s$
$QG$	Caudal en la entrada de Galería.	$m^3/s$
$r_o$	Radio de la tubería	$m$
$Re$	Número de Reynolds	
$Rh$	Radio hidráulico.	$m$
$V$	Volumen del fluido.	$m^3$
$V$	Velocidad de flujo.	$m/s$
$V_h$	Velocidad a la distancia $h$ en el contorno.	$m/s$
$V_c$	Velocidad de corte	$m/s$
$x$	Distancia desde el borde y a lo largo de la placa.	$m$

$\rho$	Densidad del fluido	$kg/m^3$
$\tau$	Esfuerzo tangencial	$N/m^2$
$\lambda$	Coeficiente de fricción.	[ - ]
$\varepsilon$	Rugosidad absoluta	$M$
$\nu$	Viscosidad cinemática del fluido	$m^2/s$
$\mu$	Viscosidad dinámica o absoluta	$Kg/ms$
$\tau_o$	Esfuerzo de corte sobre el contorno	$N/m^2$
$\tau_h$	Esfuerzo de corte a la distancia $h$ del contorno.	$N/m^2$
$\delta$	Sub capa laminar	$m$
$\delta_L$	Capa Laminar	$m$
$\delta_T$	Capa Turbulenta	$m$
$\kappa$	Constante de Karman	[ - ]

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación tiene como objetivo principal la modelación numérica de una estructura hidráulica denominada: estructura de interconexión de flujos, aplicando el paquete computacional ANSYS CFX academic, con metodología CFD (Dinámica de fluidos computacional), con el fin de evaluar el comportamiento del flujo y la interacción del mismo con las fronteras de la estructura (Ortega, 2015). La validación y calibración del modelo se los realizó con los resultados del Informe Técnico "Estudio en Modelo Hidráulico, Escala 1:20 De la estructura de Unión Sarapullo - Toachi. Informe Técnico", resultados obtenidos en el Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos (CIERHI) de la Escuela Politécnica Nacional. Además, para el desarrollo del proyecto de titulación, se utilizó la información entregada por HIDROTOAPI, 2011 sobre la descripción del Proyecto Sarapullo – Alluriquín y los planos en prototipo.

Una vez calibrado el modelo numérico, se analizó los escenarios propuestos en el estudio experimental, en el cual se caracteriza el comportamiento hidráulico del flujo para la unión de dos flujos presurizados.

En este estudio se determina los coeficientes de pérdida de energía en la convergencia de dos flujos a presión, se revisó los modelos y ecuaciones matemáticas en las que se basa la dinámica de fluidos computacional CFD, para la simulación de flujos, se describe los modelos de turbulencia y esquemas numéricos de solución que complementan el análisis CFD, además se establece la configuración apropiada en el software computacional ANSYS CFX Academic (Giraldo, 2017), con el fin de obtener resultados numéricos semejantes al fenómeno real.

## ABSTRACT

The main objective of the present titration work is the numerical modeling of a hydraulic structure called: interconnection structure, applying the ANSYS CFX academic computational package, with CFD (Computational Fluid Dynamics) methodology, in order to evaluate the behavior of the flow and the interaction of the same with the borders of the structure (Ortega, 2015). The validation and calibration of the model were made with the results of the Technical Report "Study in Hydraulic Model of the Union Structure Sarapullo - Toachi", results obtained in the Laboratory C.I.E.R.H.I corresponding to the study in physical model at scale 1:20 mentioned above.

Once the numerical model is calibrated, the proposed scenarios are analyzed in the experimental study, in which the hydraulic flow behavior is characterized for the union of two pressurized flows.

In this study we determine the energy loss coefficients in the convergence of two flows under pressure, we reviewed the mathematical models and equations on which the computational fluid dynamics CFD is based, for the simulation of flows, we described the models of turbulence and numerical solution schemes that complement the CFD analysis, in addition the appropriate configuration was established in the computer software ANSYS CFX Academic (Giraldo, 2017), in order to obtain results that are very similar to the real phenomenon.

2

El análisis de las pérdidas locales de energía de una estructura de interconexión de flujos a presión, comúnmente utiliza criterios y bases de dimensionamiento recomendados en manuales de diseño y se basan en la clásica hidráulica unidireccional (CONAGUA, 2015). No obstante, en casi todos los casos se presentan algunas incertidumbres sobre el real funcionamiento hidráulico del flujo y la adecuada valoración de las pérdidas de energía. En particular cuando se conectan dos conductos cerrados de diferente geometría, donde no solo aparecen superficies de corte no permanentes en el espacio y en el tiempo, sino también zonas de separación de o recirculación. Es decir, se requiere del análisis tridimensional para conocer el desarrollo de los flujos, en función de las diferentes combinaciones de caudal que forman parte del plan de operación de la estructura de unión. Evidentemente, sobre la base de este conocimiento, se podrán evaluar en forma efectiva los coeficientes de pérdidas continuas y localizadas en el tramo de la estructura bajo análisis.

### 1.2 GENERALIDADES Y DEFINICIONES DEL FLUJO A PRESIÓN.

El flujo de un líquido en una tubería viene acompañado de una pérdida de energía, que suele expresarse en términos de energía por unidad de peso de fluido circulante, denominada pérdida de carga (Mendoza & Mejía, 2017).

En una estructura que trabaja con flujo a presión por medio de conductos cerrados, las principales fuerzas que intervienen en el análisis hidráulico son las de presión donde se pueden aplicar las ecuaciones básicas de la hidráulica para flujo unidireccional, tanto para régimen turbulento como para régimen laminar. El tipo de energía que se pierde en estos conductos cerrados es la energía de presión, la misma que es inducida por dos razones: pérdidas por fricción y localizadas.

#### 1.2.1 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS FLUIDOS

##### Densidad de un fluido.

Es la relación de la masa por unidad de volumen como se indica en la ecuación siguiente:

## CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES.

El modelo en estudio se trata de una estructura en forma de "yee", cuyas entradas de caudal tienen diferentes geometrías, dichos flujos provienen tanto de la Bocatoma del embalse Toachi como del túnel de descarga Sarapullo, estos flujos se unen y son conducidos por la galería de interconexión, hasta llegar a la Central Hidroeléctrica Alluriquín.

La dinámica de fluidos computacional CFD se considera una ciencia aplicada a la mecánica de fluidos que se encarga de encontrar la solución numérica al conjunto de ecuaciones que gobiernan el comportamiento tridimensional de un fluido a través de métodos numéricos y algoritmos (Lozano, 2013).

El desarrollo de la Dinámica de Fluidos Computacional es una consecuencia de las herramientas electrónicas de cálculo cada vez más potentes, estas técnicas son un resultado más de la revolución informática de finales del siglo XX.

La simulación numérica se ha convertido en una alternativa confiable a la hora de resolver problemas aplicados al diseño en ingeniería, mediante ecuaciones de conservación y modelos de turbulencia, complementándose con los métodos tradicionales como el teórico y el experimental, que han sido utilizados por mucho tiempo (Berrones & Quilligana, 2017). La aplicación de la simulación numérica en el campo de ingeniería permite al diseñador pronosticar el comportamiento de los fluidos en una estructura hidráulica con la finalidad de realizar posteriores progresos en los modelos analizados, partiendo de información recopilada de prototipos o modelos físicos que permiten la calibración del modelo numérico" (Pachacama, 2015). La modelación de un modelo numérico es una tarea que requiere de menos recursos materiales, económicos y de tiempo respecto a realizar la modificación de un modelo físico. La metodología CFD tiene como ventaja que se puede obtener una gran cantidad de resultados en cualquier instante de tiempo en un corto plazo, sin embargo, la desventaja radica en que, a mayor eficiencia de resultados, mayor será el requerimiento computacional (Martínez, 2018).

3

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

Dónde:

$\rho$  = Densidad del fluido.

$m$  = masa del fluido.

En el Sistema Inglés (SI), la densidad del agua es  $1000 \text{ kg/cm}^3$  a una temperatura de  $4^\circ \text{C}$ .

##### Peso específico.

Corresponde al peso de la unidad de volumen de dicha sustancia, en los líquidos generalmente se considera constante para las variaciones ordinarias de presión (Giles & Evett, 1996).

$$P_e = \frac{W}{V} \quad (1.2)$$

Dónde:

$W$  = Peso

$V$  = Volumen del fluido.

##### Viscosidad de un fluido.

Esta propiedad se debe esencialmente a la interacción entre las moléculas del fluido, indica la resistencia opuesta a las fuerzas cortantes. En los líquidos a razón de que la temperatura aumenta, la viscosidad disminuye, y no sufre mayor afectación con la variación de presión (Giles & Evett, 1996).

##### Presión de vaporización.

Cuando en un espacio cerrado que contiene un líquido se extrae el aire que queda sobre la superficie del líquido provocando un vacío, se generará una presión debido a las moléculas que escapan del fluido. Cuando se alcanza el equilibrio es decir, que el número de moléculas que salen es igual al número de moléculas que entran al fluido, se dice que el vapor está saturado y la presión que el vapor ejerce sobre la superficie del líquido se denomina presión de vapor.

La presión de vapor es directamente proporcional a la temperatura (Guerra, 2014). V

### Tensión superficial.

Es el trabajo que se necesita para mover cierta cantidad de moléculas desde el interior de un líquido hasta la superficie para de esta manera crear una nueva superficie. (Domingo, 2011). Es la resultante de las fuerzas de cohesión ( propiedad para resistir a pequeños esfuerzos de tensión, es la razón de formación de gotas de agua) cuando las moléculas del líquido se atraen mutuamente formando una película entre la interfaz del agua y el aire. Se habla de tensión superficial para los líquidos sólo en las interfaces líquido – líquido o líquido – gas. Por lo tanto, cuando se especifica la tensión superficial, es importante distinguir el líquido o gas adyacente (Monge, 2017).

En la siguiente tabla se observa los valores de las propiedades mecánicas del agua según varía la temperatura.

**Tabla 1.1:** Propiedades mecánicas del agua.

Temp. °C	Densidad $\rho$ kg/m <sup>3</sup>	Peso Específico $\gamma$ N/ m <sup>3</sup>	Viscosidad Dinámica N s/m <sup>2</sup>	Tensión Superficial. (N/m)	Presión de vapor kPa
0	1000	9.81	$1.75 \times 10^{-3}$	0.0756	0.611
10	999	9.81	$1.30 \times 10^{-3}$	0.0742	1.23
20	998	9.79	$1.02 \times 10^{-3}$	0.0728	2.34
30	996	9.77	$8.00 \times 10^{-4}$	0.0712	4.24
40	992	9.73	$6.51 \times 10^{-4}$	0.0696	7.38
50	988	9.69	$5.41 \times 10^{-4}$	0.0679	12.30
60	984	9.65	$4.60 \times 10^{-4}$	0.0662	19.90
70	978	9.59	$4.02 \times 10^{-4}$	0.0664	31.20
80	971	9.53	$3.50 \times 10^{-4}$	0.0626	47.40
90	965	9.57	$3.11 \times 10^{-4}$	0.0608	17.2
100	958	9.40	$2.82 \times 10^{-4}$	0.0589	101.3

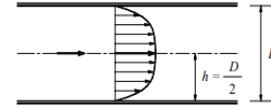
Fuente: (Giles & Evett, 1996).  
Modificado por: Jenny Carrera.

### 1.2.2 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN FLUJO A PRESIÓN.

El vector velocidad es tridimensional en cada punto de la corriente, para estudiar la variación de velocidades de un fluido se debe tomar en cuenta la forma de su sección transversal, debido a que las características geométricas del contorno y su

naturaleza definen básicamente la curva de distribución de velocidades. Como se puede visualizar en la FIGURA 1.1, en las tuberías, la influencia del contorno es simétrica y definida, la velocidad es máxima en el eje y mínima en el contorno, en  $h = D/2$ , se obtiene la velocidad máxima (Rocha, 2015).

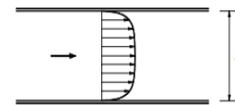
**FIGURA 1.1:** Distribución de velocidades en una tubería.



Fuente: (Rocha, 2015).

El grado de turbulencia, el grado de rugosidad del contorno y el alineamiento, son factores importantes en la distribución de velocidades. Cuando se tiene números de Reynolds elevados se dice que existe turbulencia plenamente desarrollada y la distribución de velocidades tiende a hacerse uniforme, menos en la zona próxima al contorno donde los esfuerzos viscosos y el gradiente de velocidades son muy grandes (Rocha, 2015), como se puede observar en la FIGURA 1.2.

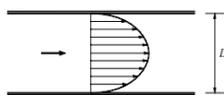
**FIGURA 1.2:** Distribución de velocidades en una tubería con flujo turbulento.



Fuente: (Rocha, 2015).

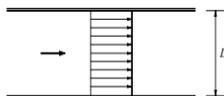
El gradiente de velocidades para un flujo laminar es muy grande en toda la sección transversal y su distribución será del tipo parabólico, como se visualiza en la FIGURA 1.3, la distribución de velocidades sería uniforme si se considera un flujo ideal, sin viscosidad, cuyo número de Reynolds sea infinito, como se puede observar en la FIGURA 1.4 (Rocha, 2015).

**FIGURA 1.3:** Distribución de velocidades en una tubería con flujo laminar.



Fuente: (Rocha, 2015).

**FIGURA 1.4:** Distribución de velocidades en una tubería con fluido ideal.



Fuente: (Rocha, 2015).

### 1.2.3 DISTRIBUCIÓN DEL ESFUERZO CORTANTE.

La característica principal que distingue a un sólido de un fluido es que el sólido resiste la aplicación de una fuerza tangencial por unidad de área (esfuerzo cortante) sin deformarse, en cambio un fluido se deforma con la aplicación de esfuerzos de corte (Illan, 2013). Por definición se tiene la siguiente ecuación.

$$\bar{\tau} = \frac{F}{A} = \text{esfuerzo cortante promedio} \quad (1.3)$$

Donde:

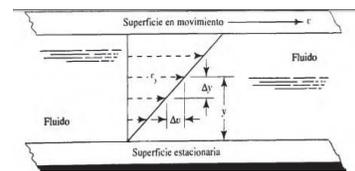
$\tau$ , esfuerzo tangencial, es la fuerza ejercida tangencialmente sobre el área, llamada esfuerzo cortante o de corte.

$F$  = Fuerza ejercida.

$A$  = Área.

El rozamiento interno en un fluido da lugar a esfuerzos cortantes cuando dos capas adyacentes se mueven la una sobre la otra (ver FIGURA 1.5), cuando el fluido se mueve por tubería o se encuentra algún obstáculo. En algunos casos estos esfuerzos son despreciables si se comparan con fuerzas gravitatorias o con las originadas por diferencias de presión (Illan, 2013).

**FIGURA 1.5:** Gradiente de velocidad de un fluido en movimiento.



Fuente: (Rojas, 2004).

El esfuerzo cortante es la fuerza que se requiere para que una unidad de área de una sustancia se deslice sobre otra, y se mide en N/m<sup>2</sup> o lb/pie<sup>2</sup>. Conforme un fluido se mueve dentro de él se produce un esfuerzo cortante cuya magnitud depende de la viscosidad del fluido. La magnitud del esfuerzo cortante es directamente proporcional al cambio de velocidad entre las posiciones diferentes del fluido (gradiente de velocidad), esto ocurre en fluidos como el agua, el alcohol u otros líquidos comunes (Mott, 2006). La forma matemática para expresar lo indicado es la siguiente.

$$\tau = \mu(\Delta v/\Delta y) \quad (1.4)$$

Donde:

$\tau$  = Esfuerzo cortante.

$\mu$  = Viscosidad dinámica del fluido.

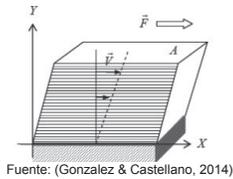
$\Delta v$  = Cambio de velocidad.

$\Delta y$  = Cambio de posición.

$\Delta v/\Delta y$  = Gradiente de velocidad.

Como ya se mencionó, a diferencia de los sólidos, los fluidos son sustancias que se deforman continuamente al aplicarles un esfuerzo cortante, resulta que éste es proporcional al ritmo de la variación de la deformación (Gonzalez & Castellano, 2014).

FIGURA 1.6: Régimen laminar en un fluido viscoso.



Se puede tratar al fluido como distintas capas que se deslizan unas sobre otras debido a que el esfuerzo cortante no es muy grande, esto ocurre en el régimen laminar. Estas láminas de fluido tienen un rozamiento entre ellas debido a la viscosidad del fluido, se puede ver que a mayor distancia "y", la velocidad de cada una de las capas es mayor (Gonzalez & Castellano, 2014).

1.2.4 PÉRDIDAS DE ENERGÍA DE UN FLUJO A PRESIÓN.

1.2.4.1 Pérdidas por fricción.

Cuando una masa líquida se desplaza por un conducto cerrado se presentan esfuerzos tangenciales que se oponen al movimiento debido a la presencia de rugosidades, la viscosidad del fluido y la turbulencia del flujo.

En régimen turbulento estas pérdidas aparecen debido a la mezcla entre las partículas del fluido y la fricción entre las fronteras sólidas del conducto y el agua, a lo largo de toda la longitud (Sotelo, 1982).

Las pérdidas por fricción se pueden evaluar con la ecuación de Darcy – Weisbach. En régimen turbulento, no resulta posible resolver analíticamente las ecuaciones de Navier – Stokes, sin embargo, experimentalmente se puede comprobar que la dependencia entre los esfuerzos cortantes y la velocidad es aproximadamente cuadrática por tanto se puede utilizar la ecuación antes mencionada (Zenit, 2017).

$$hf = \lambda * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} = \lambda * \frac{L}{4Rh} * \frac{V^2}{2g} \tag{1.5}$$

$k_{ij}$  = Coeficiente de pérdida localizada.

$g$  = Gravedad.

$v$  = Velocidad media de flujo.

También se puede encontrar las pérdidas locales mediante la siguiente ecuación:

$$h_L = \frac{k_{ij} * Q^2}{A^2 * 2g} \tag{1.8}$$

Dónde:

$h_L$  = Pérdida de carga local.

$k_{ij}$  = Coeficiente de pérdida localizada.

$g$  = Gravedad.

$Q$  = Caudal.

$A$  = Área de la sección transversal.

PÉRDIDAS POR LA CONVERGENCIA DE FLUJOS.

Las pérdidas producidas en la unión de dos o más conductos se originan principalmente debido a los siguientes factores:

- Fricción viscosa del flujo con las paredes de la unión.
- Fricción viscosa entre flujos que interaccionan y que poseen diferente energía cinética y cantidad de movimiento (unión de flujos).
- Desprendimiento de la capa límite interna y generación de regiones de flujo, despegue que posteriormente se desarrolla y vuelve a adherirse a las paredes del conducto (zonas de separación) (Maldonado & Pallares, 2015).

COEFICIENTE DE PÉRDIDA LOCAL EN UNIONES DE FLUJOS.

Para el cálculo teórico del coeficiente de pérdida local en uniones se puede tomar de referencia los valores recomendados en el texto "Handbook of Hydraulic Resistance", de l'delchik, 1996. Este autor toma como parámetros fundamentales las relaciones de áreas entre los conductos, el ángulo formado por los dos conductos antes de unirse, el radio de los chaffanes o aristas en la unión de los dos conductos y las relaciones de caudales que intervienen en el proceso de mezcla de los flujos (CIERHI - EPN, 2011).

Donde:

$hf$  = Pérdida por fricción.

$L$  = Longitud de la tubería.

$D$  = Diámetro de la tubería a presión.

$V$  = Velocidad media.

$Rh$  = Radio Hidráulico.

$\lambda$  = Parámetro adimensional, denominado coeficiente de fricción, que generalmente está en función del número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería.

La determinación del parámetro  $\lambda$  se puede realizar con la ayuda de la ecuación de Colebrook – White la cual es aplicable en tubos lisos o rugosos en zonas de transición o turbulencia.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left( \frac{\epsilon}{3.71D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}} \right) \tag{1.6}$$

Dónde:

$\epsilon$  = Rugosidad absoluta

$D$  = Diámetro

$Re$  = Número de Reynolds

1.2.4.2 Pérdidas de carga localizadas o menores.

Son producidas por la presencia de accesorios como: codos, válvulas, piezas de reducción, entre otros (Sotelo, 1982). En el caso de sistemas de tuberías de varios kilómetros estas pérdidas son despreciadas, ya que en comparación con las pérdidas de fricción el valor de pedidas localizadas resulta menor, sin embargo, en tramos cortos pueden resultar mayores que las pérdidas por fricción. Las pérdidas de carga locales pueden ser calculadas mediante la siguiente ecuación:

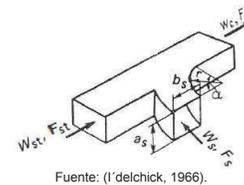
$$h_L = k_{ij} * \frac{v^2}{2 * g} \tag{1.7}$$

Donde:

$h_L$  = Pérdida de carga local.

El esquema de unión que se utiliza en el libro de l'delchick para el cálculo del coeficiente de pérdida se puede ver en la FIGURA 1.7, correspondiente a dos entradas y una salida de flujo (l'delchick, 1966).

FIGURA 1.7: Esquema de la estructura de unión en base al manual de l'delchick.



Fuente: (l'delchick, 1966).

Las ecuaciones planteadas por l'delchick para el cálculo de los coeficientes se mencionan a continuación.

$$k_{CS} = a_1 \left( \frac{Q_S}{Q_C} \right)^2 + b_1 \frac{Q_S}{Q_C} + c_1 \tag{1.9}$$

$$k_{CSr} = a_2 \left( \frac{Q_S}{Q_C} \right)^2 + b_2 \frac{Q_S}{Q_C} + c_2 \tag{1.10}$$

$$K_S = \frac{K_{CS}}{\left( \frac{Q_S \cdot F_C}{Q_C \cdot F_S} \right)^2} \tag{1.11}$$

$$K_{St} = \frac{K_{CS}}{\left( 1 - \frac{Q_S}{Q_C} \right)^2 \left( \frac{F_C}{F_{St}} \right)^2} \tag{1.12}$$

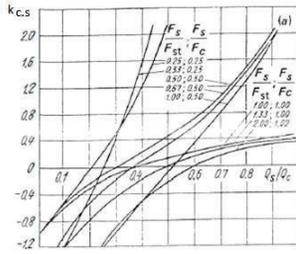
Dónde:

$\frac{Q_S}{Q_C}$  = Relación de Caudales de entrada y salida del flujo.

$\frac{F_C}{F_{St}}$  = Relación de áreas de entrada y salida

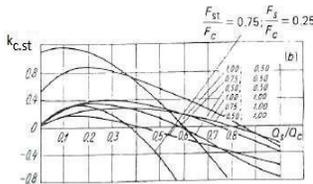
Los valores de los coeficientes  $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$  se encuentran tabulados en el libro "Handbook of Resistance" I.E. I'delchick, Diagrama 7-11. El autor también propone ábacos para obtener los coeficientes de pérdida en estructuras de unión, estos ábacos se muestran a continuación en las siguientes figuras.

FIGURA 1.8: Ábaco de I'delchick para determinar el valor de  $K_{c,s}$ .



Fuente: (I'delchick, 1966).  
Modificado por: Jenny Carrera.

FIGURA 1.9: Ábaco de I'delchick para determinar el valor de  $K_{c,st}$ .



Fuente: (I'delchick, 1966).  
Modificado por: Jenny Carrera.

En la FIGURA 1.8 y 1.9 se muestran las gráficas de ábacos que presenta I'delchick donde se indican los coeficientes de pérdida para diferentes relaciones de área y relaciones de caudal.

- En los casos de las tuberías en que la longitud excede mil veces el diámetro, la pérdida de carga por fricción es predominante con respecto a caídas de presión motivadas por las resistencias locales (boquilla de entrada, cambios de dirección, variaciones de sección, válvulas etc.) por ende se prescinde de considerar estas resistencias (Rojas, 2004).

### 1.3 OBJETIVO GENERAL

Aplicar un modelo de simulación numérica utilizando el paquete computacional ANSYS CFX academic, que resuelva la unión de dos flujos a presión, cuyos conductos cerrados tienen diferente geometría.

### 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar los lineamientos básicos para la determinación de las pérdidas de energía para el caso de la convergencia de dos flujos a presión.
- Calibrar el modelo numérico con la información existente recopilada del modelo físico de la estructura de unión Sarapullo Toachi.
- Analizar las características hidrodinámicas del flujo como: patrón de velocidades, zonas de separación de flujo y/o reflujo en la estructura de interconexión de flujos para diferentes caudales.
- Evaluar los coeficientes de pérdida de energía local en la estructura de unión de flujos.

### 1.5 ALCANCE Y JUSTIFICACIÓN

#### 1.5.1 ALCANCE

El presente proyecto busca implementar la modelación numérica tridimensional con el fin de evaluar los coeficientes de pérdidas de energía en la estructura de interconexión Sarapullo – Toachi, aplicando el paquete computacional ANSYS CFX con metodología CFD (Dinámica de Fluidos Computacional). El estudio analizará la red de flujo en la estructura de interconexión para diferentes caudales de operación y determinará las características hidrodinámicas más relevantes de la convergencia de ambos flujos.

#### 1.2.5 DISEÑO CON FLUJO A PRESIÓN.

Al realizar el diseño en conducciones a presión, se deben considerar los siguientes aspectos.

- Determinación del diámetro óptimo de la conducción.

Para el diseño de sistemas de tuberías es importante la velocidad que alcanza el fluido en el interior de las conducciones. En la mayoría de casos esta velocidad viene determinada por el caudal y el diámetro de la sección interna de la conducción, y para cada fluido, esta velocidad tiene un valor máximo que no debe ser sobrepasado, ya que de lo contrario puede producirse un deterioro en el material del que está construido la conducción, por tratamiento mecánico inadecuado. (Rojas, 2004).

- Cálculo de las pérdidas de carga.

Es esencial conocer sobre la capacidad de carga y la pérdida de fricción para el material de la tubería. Al producirse fricción entre el fluido y las paredes de la tubería por la que circula, provoca en el mismo una caída de presión. Es necesario conocer el valor de esta caída para comprobar que el diámetro elegido para la conducción es suficiente, pues de ser éste muy pequeño la pérdida de carga que se produzca será muy elevada (Rojas, 2004).

En el diseño con fluidos a presión los problemas que suelen suscitarse y deben ser analizados son:

- Si como datos iniciales se tiene las características de las tuberías es decir diámetros, caudal, cargas en el origen, curvas, etc, se procura calcular la pérdida de carga que se produce, se debe elegir la más conveniente desde el punto de vista económico, tomando para ello el diámetro que haga mínima la suma de los costos de instalación y de explotación.
- Si se conociera las características del conducto, el desnivel piezométrico disponible y se trata de determinar el caudal que circula, para resolverlo se igualará la pérdida de carga total por la carga disponible. (Rojas, 2004)

Se realizará la simulación de los nueve escenarios presentados en el modelo físico a escala reducida con el fin de estudiar el comportamiento del flujo y calcular las pérdidas de energía en el interior de la conducción, así como también visualizar zonas de reflujo de ser el caso.

Se establecerán criterios técnicos sobre el uso del software ANSYS CFX para modelar estructuras de interconexión, se compararán los resultados de la modelación numérica en el paquete computacional ANSYS CFX con los resultados de la modelación física (Monge, 2017), de la misma estructura tomados del Informe Técnico "Estudio en Modelo Hidráulico de la estructura de Unión Sarapullo – Toachi", resultados obtenidos en el Laboratorio CIERHI - EPN, 2012.

#### 1.5.2 JUSTIFICACIÓN.

##### 1.5.2.1 Justificación teórica.

En general en un proyecto de aprovechamiento hídrico, por ejemplo: de generación hidroeléctrica, el análisis de los coeficientes de pérdida de energía local en la tubería es importante ya que de eso depende el dimensionamiento apropiado de todo el sistema de generación o de aprovechamiento hídrico y también la elaboración de un plan de funcionamiento eficiente del equipamiento asociado al sistema de tuberías a presión. Por lo tanto, el estudio de las pérdidas localizadas en conductos a presión es un componente fundamental en el diseño y en la valoración de los beneficios a ser obtenidos del funcionamiento del sistema hidráulico.

##### 1.5.2.2 Justificación metodológica.

La metodología CFD permite el análisis y la solución de los problemas de mecánica de fluidos, asociados al desarrollo de flujos en las tres dimensiones. No obstante, su uso requiere una comparación y calibración previa con resultados obtenidos en modelos físicos y/o prototipos. La metodología del programa ANSYS CFX aplica el método de volúmenes finitos, lo cual permite calcular los parámetros hidráulicos (velocidad, presión, entre otros.) cumpliendo el equilibrio de las ecuaciones de Navier – Stokes promediadas (RANS) que rigen el movimiento del fluido.

### 1.5.2.3 Justificación práctica.

Con este trabajo se pretende formular una herramienta complementaria para el diseño y optimización hidráulica de una estructura de unión de flujos en geometrías diferentes, con la ayuda de recursos computacionales, como lo es la metodología CFD (Casas & Cárdenas, 2017). La modelación numérica es un complemento imprescindible a la modelación física, ambos tipos de estudios tanto físicos como numéricos son recursos disponibles a fin de evaluar el comportamiento real de un fluido en tres dimensiones.

El desarrollo del presente proyecto de titulación, aportará en la consolidación de la experiencia del grupo de investigación dedicado a la modelación numérica de fenómenos hidráulicos, ampliando su experiencia en el manejo y aplicabilidad de los últimos paquetes CFD para la modelación numérica tridimensional de un flujo complejo.

## CAPÍTULO 2 BASE TEÓRICA DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS Y ESTADO DEL ARTE.

### 2.1 INTRODUCCIÓN A LA DINÁMICA DE FLUIDOS CON FLUJO A PRESIÓN.

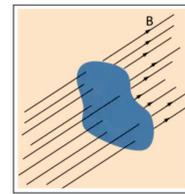
La mecánica de fluidos estudia el comportamiento de los fluidos, ya sea en reposo o en movimiento. Ciertas propiedades de los fluidos desempeñan un papel importante para el desarrollo de los principios de la mecánica de fluidos, como, por ejemplo: en la estática de los fluidos la propiedad predominante es el peso específico, mientras que en el flujo de fluidos predominan la densidad y la viscosidad. Los principios físicos que rigen el movimiento de los fluidos son: la conservación de la materia, energía y las leyes del movimiento de Newton (Domingo, 2011).

#### 2.1.1 DEFINICIONES GENERALES.

##### 2.1.1.1 Campo de flujo.

Un campo de flujo es cualquier región en el espacio donde hay un fluido en movimiento, es decir que la región o subregión del flujo queda ocupada por un fluido. Es posible determinar o especificar varias magnitudes físicas, estas sean escalares, vectoriales y tensoriales, en cada punto del campo.

FIGURA 2.1: Campo de Flujo.



Fuente: (Guerra, 2014).

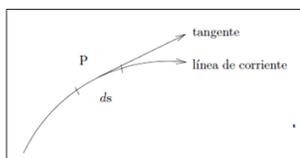
Los campos tensoriales, vectoriales y escalares pueden formar campos dependientes o independientes dentro de un mismo flujo, además son funciones de punto y de tiempo debido a que su magnitud puede variar no solo de un punto a otro sino también de un instante a otro (Guerra, 2014).

- **Campo de velocidades.** Se define como la rapidez temporal del cambio de posición de una partícula fluida. La velocidad en cualquier punto del campo de flujo puede cambiar de un instante a otro, por lo que el campo de velocidad está dado por  $V(x, y, z, t)$ .
- **Campo Rotacional.** Es un campo derivado del campo de las velocidades e indica la rotación local de una partícula en un fluido y su definición matemática es el producto vectorial del operador nabla con el vector velocidad,  $\nabla \times \vec{V}(x, y, z)$ .

#### 2.1.1.2 Líneas de corriente.

A las curvas imaginarias dibujadas a través de un fluido en movimiento y que muestran la dirección de éste en los diferentes puntos del flujo se las conoce como líneas de corrientes. Como se puede observar en la FIGURA 2.2, la dirección instantánea de la velocidad de las partículas fluidas es representada por la tangente en un punto de la curva. Las tangentes a las líneas de corriente representan la dirección media de la velocidad. No existe en ningún punto, flujo perpendicular a la línea de corriente ya que la velocidad normal a la línea de corriente es nula (Gallegos, 2009).

FIGURA 2.2: Elemento de una línea de corriente.



Fuente: (Gallegos, 2009).

La ecuación que representa a una línea de corriente se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{dx}{u} = \frac{dy}{v} = \frac{dz}{w} \quad (2.1)$$

- **Tubo de corriente.** Es un tubo formado por líneas de corriente. En este caso las partículas no pueden salir ya que la velocidad en las paredes es paralela a ellas. De esta manera se representa el flujo en una tubería, de la cual no puede salir el fluido. (Guerra, 2014)

#### 2.1.1.3 Trayectoria.

Trayectoria es el camino que sigue realmente la partícula de un fluido y está definida a lo largo del tiempo. Si se requiere obtener analíticamente la trayectoria se integra el campo de velocidades para obtener las ecuaciones paramétricas  $(x(t), y(t), z(t))$  de la misma, para un elemento del flujo que en un cierto instante pasan por un punto de referencia. Si eliminamos el tiempo entre las distintas ecuaciones obtenemos la ecuación de la trayectoria (Domingo, 2011).

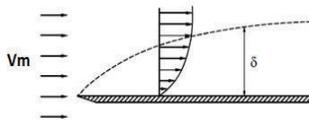
#### 2.1.1.4 Concepto de la capa límite.

La capa límite  $\delta$ , es una capa de fluido cercana a la pared donde los efectos viscosos no pueden ser despreciados, es la región donde se efectúa la transición entre las velocidades del flujo libre y aquellas de la pared (Rocha, 2015).

Al colocar un obstáculo en un flujo paralelo que se desarrolla en un espacio infinito, se producirá fricción entre el fluido y la superficie del cuerpo. En el contorno mismo la velocidad del fluido debe ser cero, en las inmediaciones del cuerpo la distribución de velocidades estará determinada por los esfuerzos viscosos y por tanto aparecerá un gradiente de velocidad. Al alejarnos del cuerpo, normalmente a su superficie, la velocidad aumenta desde cero en el contorno hasta alcanzar, a una distancia  $\delta$  la velocidad que tendría en ausencia del cuerpo (Rocha, 2015). Considerando que el flujo es bidimensional en un cuerpo que está formado por una placa lisa y delgada con borde de ataque agudo. Esta zona de espesor variable  $\delta$  que se inicia en el

borde de ataque y que crece hacia aguas abajo se denomina capa límite, (ver FIGURA 2.3)

FIGURA 2.3: Generación de una capa límite.



Fuente: (Rocha, 2015).  
Modificado por: Jenny Carrera.

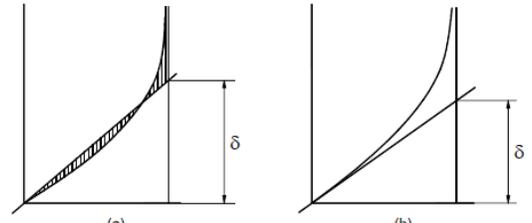
La teoría de la capa límite de Prandtl consiste en dividir el flujo en dos regiones: una región de flujo exterior que es inviscido y/o irrotacional, y una región de flujo interior llamada capa límite  $\delta$  (Rocha, 2015).

En la región de flujo exterior se usa la ecuación de continuidad y las ecuaciones de Euler para obtener el campo de velocidad de flujo exterior y la ecuación de Bernoulli para obtener el campo de presión. Dentro de la capa límite los esfuerzos viscosos son intensos y determinan un fuerte gradiente de velocidades. El espesor de esta capa es más pequeño mientras mayor es el número de Reynolds. Para un número de Reynolds infinito, que corresponde a un fluido ideal, sin viscosidad, es evidente que el espesor de la capa límite es nulo (Rocha, 2015).

• **ESPESOR DE LA CAPA LÍMITE.**

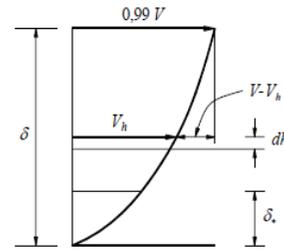
Se considera como espesor de la capa límite la distancia a la cual la velocidad es 99% de la que existiría en ausencia del contorno como se indica en la FIGURA 2.5 (Rocha, 2015). En la FIGURA 2.4 se indica la manera de definir el espesor nominal de la capa límite, en la primera figura, (a) se traza la asíntota y una recta que partiendo del origen intercepta a la asíntota de modo que las áreas achuradas sean iguales. En la segunda figura (b), se intercepta la asíntota con una tangente a la curva de origen (Rocha, 2015).

FIGURA 2.4: Definición del espesor de la capa.



Fuente: (Rocha, 2015)

FIGURA 2.5: Espesor de la capa límite.

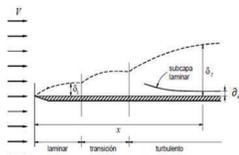


Fuente: (Rocha, 2015)

• **DESARROLLO DE LA CAPA LÍMITE.**

Se puede observar en la FIGURA 2.6, que el flujo que se aproxima a la placa puede ser laminar o turbulento. Si la superficie de la placa es suficientemente lisa, la capa límite es laminar hasta una cierta distancia del borde de ataque, después de pasar por una transición se vuelve turbulenta. Dentro de esta capa turbulenta aparece una subcapa denominada subcapa laminar  $\delta_s$ , (Rocha, 2015).

FIGURA 2.6: Desarrollo de la capa límite.

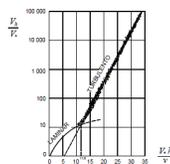


Fuente: (Rocha, 2015).  
Modificado por: Jenny Carrera.

La FIGURA 2.6, representa la capa límite desarrollada, donde se observan las fases antes descritas. Para un determinado valor de  $x$  la capa límite turbulenta se habrá desarrollado integralmente en la sección transversal y  $\partial_r$  es igual al radio. Si las paredes de la tubería son suficientemente lisas se desarrollará una subcapa laminar de espesor  $\delta_s$ , (Rocha, 2015). El espesor de la subcapa laminar se denomina con la letra  $\delta_s$ , dentro de esta subcapa el esfuerzo cortante es constante e igual al esfuerzo cortante sobre el fondo (Rocha, 2015) ( $\tau_h = \tau_0$ , para  $h \leq \delta_s$ ). Para determinar el valor de la subcapa laminar, se parte de que la distribución de velocidades en un conducto liso tiene una relación entre dos parámetros adimensionales (Rocha, 2015).

$$\frac{V_h}{V} = \frac{V_h h}{\nu} \quad (2.2)$$

FIGURA 2.7: Relación entre parámetros adimensionales para el cálculo de la distribución de velocidades.



Fuente: (Rocha, 2015)

Al llevar los valores de la ecuación 2.2, a un gráfico semilogarítmico (ver FIGURA 2.7) representado tanto para el flujo laminar como para el flujo turbulento se tiene que la intersección de las dos curvas marca el límite de la aplicación de cada una de las ecuaciones (Rocha, 2015).

Dicha intersección resulta ser 11.6, por lo que:

$$\frac{V_h h}{\nu} = 11.6 \quad (2.3)$$

Al remplazar  $h$  por  $\delta_s$ , la ecuación sería:

$$\frac{V_s \delta_s}{\nu} = 11.6 \quad (2.4)$$

Dentro de la capa límite la transición entre el flujo laminar y turbulento se produce para valores de Reynolds comprendidos entre  $2 \times 10^5$  y  $10^6$ , expresando el número de Reynolds de la siguiente manera:

$$Re = \frac{Vx}{\nu} \quad (2.5)$$

Donde:

$x$  = Distancia medida desde el borde de ataque y a lo largo de la placa en la dirección del escurrimiento.

- La ecuación que representa el espesor de la capa límite laminar  $\delta_s$  es:

$$\delta_s = \frac{5x}{Re^{1/2}} = 5 \left( \frac{\nu}{V} \right)^{1/2} x^{1/2} \quad (2.6)$$

- De igual manera la ecuación para expresar el espesor de la capa límite turbulenta  $\delta_T$  es:

$$\delta_T = \frac{0.38x}{Re^{1/5}} = 0.38 \left( \frac{\nu}{V} \right)^{1/5} x^{4/5} \quad (2.7)$$

• **LA SEPARACIÓN O EXPANSIÓN DE UN CONDUCTO.**

Como se mencionó anteriormente el flujo exterior a la capa límite se caracteriza por tener energía constante, sin embargo, normalmente la presión disminuye en la dirección del escurrimiento, por tanto, podemos decir que:

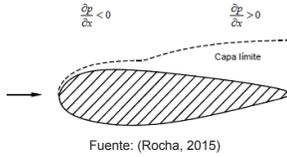
$$\frac{\partial p}{\partial x} < 0 \tag{2.8}$$

También puede suceder que debido a las características del contorno, la presión aumente en la dirección del escurrimiento.

$$\frac{\partial p}{\partial x} > 0 \tag{2.9}$$

El efecto del gradiente de presiones del escurrimiento sobre el espesor de la capa límite se ilustra en la FIGURA 2.8.

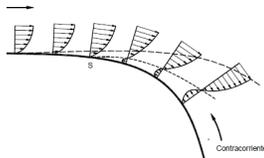
FIGURA 2.8: Variación del gradiente de presiones.



Fuente: (Rocha, 2015)

La condición  $\frac{\partial p}{\partial x} > 0$  son representadas por las líneas de corriente divergentes. Al presentarse en el escurrimiento, su efecto será muy fuerte en la capa límite ya que es allí donde se presenta el efecto de fricción del contorno.

FIGURA 2.9: Fenómeno de la separación.



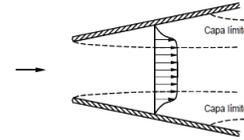
Fuente: (Rocha, 2015)

Las partículas fluidas de la capa límite se mueven muy lentamente, y al haber presión adversa van perdiendo velocidad hasta que se detienen. Luego por efecto

del gradiente de presiones positivas se produce dentro de la capa límite una contracorriente y aparece una separación que inicia en el punto S (Rocha, 2015), como se observa en la FIGURA 2.9.

La separación es el fenómeno de alejamiento del flujo de la pared. Puede ocurrir movimiento en dirección contraria a la del escurrimiento principal denominado como contracorriente. Si existiese un incremento de presión, las partículas de la capa límite perderán velocidad hasta detenerse y si la diferencia de presión es muy fuerte las partículas avanzan en dirección contraria a la del escurrimiento (Rocha, 2015), como se puede observar en la FIGURA 2.10 y 2.11.

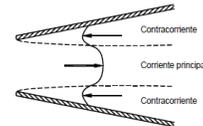
FIGURA 2.10: Desarrollo de la capa límite en una expansión.



Fuente: (Rocha, 2015)

Este problema se presenta en una expansión, en un flujo de líneas de corriente divergentes. Podría ser el caso de un difusor o un canal de sección creciente (una transición) (Rocha, 2015).

FIGURA 2.11: Aparición de contracorrientes.



Fuente: (Rocha, 2015)

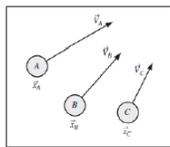
2.1.1.5 Métodos para el análisis y descripción de flujo, Euler y Lagrange.

Existen dos métodos para describir el movimiento de un fluido.

MÉTODO LAGRANGE.

Consiste en centrarse en un volumen pequeño del fluido y se sigue el movimiento de cada una de las partículas en función del tiempo a través de la ecuación que detalla la trayectoria de cada una de las partículas. En el instante  $t = 0$ , se considera que la partícula ocupa la posición  $r_0$  y en un instante  $t$ , la partícula ocupa una posición  $r$ . El vector posición depende de qué partícula se haya escogido y que tiempo haya transcurrido, es decir  $r = r(r_0, t)$ . Si se tiene el valor de  $r$  para todo  $r_0$  y todo  $t$ , se obtiene una descripción completa del flujo (Sámano & Mihir, 2009). La desventaja de este método es que se necesita una gran cantidad de ecuaciones para describir el movimiento del sistema (Domingo, 2011). Para el marco Lagrangiano, se establecen variables de referencia;  $x_0, y_0, z_0, t_0$ , y el estudio se enfoca sobre un grupo de partículas del fluido para observar los cambios (Gallegos, 2009).

FIGURA 2.12: Descripción Lagrangiana.



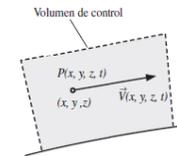
Fuente: (Cengel & Cimbala, 2006)

MÉTODO EULER.

En este método nos interesa conocer las características del flujo como velocidad, densidad, temperatura, etc, de las partículas que pasen por este punto como función de tiempo, para esto se centra la atención en un punto  $(x,y,z)$  en el espacio. Al realizar el mismo procedimiento para todos los puntos que ocupa el flujo, se tiene una descripción completa del flujo (Sámano & Mihir, 2009).

Para el marco Euleriano, las variables independientes son:  $x, y, z, t$ , y la atención se enfoca sobre el fluido que pasa a través de un volumen de control que se encuentra fijo en el espacio. El fluido dentro del volumen de control está constituido por diferentes partículas para cada instante de tiempo (Gallegos, 2009). Para la descripción del flujo de fluidos, el método común usado es la descripción Euleriana, donde para rastrear a las partículas individuales se define variables de campo que son función del espacio y tiempo dentro de un volumen de control.

FIGURA 2.13: Descripción Euleriana.



Fuente: (Cengel & Cimbala, 2006)

2.1.2 CLASIFICACIÓN DE FLUIDOS.

2.1.2.1 En función del tiempo.

FLUJO PERMANENTE.

Este flujo se presenta cuando la presión, velocidad, y otras características hidráulicas no cambian con respecto al tiempo. Ocurre cuando la velocidad de las partículas sucesivas que ocupan un punto en diferentes instantes de tiempo es la misma. Es decir, la velocidad es constante en relación al tiempo, pero si puede variar con respecto a las coordenadas espaciales (de un punto a otro). Con la premisa anterior se asume que las demás variables o magnitudes del fluido no varían con el tiempo,  $dp/dt = 0, dp/dt = 0, dQ/dt = 0$ , entre otros. Los flujos permanentes pueden ser uniformes o no uniformes. Un ejemplo de este flujo es al bombear agua a través de una tubería a caudal constante.

### FLUJO NO PERMANENTE.

Se dice que un flujo es no permanente cuando las condiciones en un punto cualquiera del fluido varían en el tiempo o bien  $dV/dt \neq 0$ . Si el agua se bombea a través de una tubería y el caudal fuese creciente con el tiempo, el flujo sería no permanente.

#### 2.1.2.2 En función del espacio.

### FLUJO UNIFORME.

Se dice que un flujo es uniforme cuando en cualquier punto del fluido el vector velocidad es idéntico, es decir, con igual módulo, dirección y sentido en un instante dado, esto se expresa por  $dV/dx = 0$ . La ecuación establece que no hay variación en el vector velocidad en cualquier dirección a través del fluido en un instante dado, pero nada se dice del cambio de velocidad en un punto con el tiempo que puede ser nulo o no. Ejemplo: cuando un conducto es prismático, es decir todas las secciones rectas paralelas son idénticas y la velocidad media en cada sección recta es la misma en un instante dado, se dice que el flujo es uniforme (Streeter, 2000).

### FLUJO NO UNIFORME.

Se dice que el flujo es no uniforme cuando el vector velocidad varía en un instante dado, de un punto a otro  $dV/dx \neq 0$ . De igual manera que en el flujo uniforme, el flujo no uniforme puede ser permanente o no permanente. Un líquido que fluye a través de una tubería de sección variable de una tubería curvada es un ejemplo de flujo no uniforme (Streeter, 2000).

#### 2.1.2.3 En función del efecto viscoso.

### FLUIDOS NEWTONIANOS.

En un fluido Newtoniano el esfuerzo tangencial es directamente proporcional a la gradiente de velocidad y al esfuerzo que fue sometido. En este grupo de fluidos podemos nombrar a los líquidos y gases.

#### 2.1.2.4 En función de las componentes en el espacio.

### FLUJO UNIDIMENSIONAL.

Este tipo de flujo desprecia la variación o cambios en la velocidad, la presión, etc, transversales a la dirección principal del flujo. Las condiciones en una sección recta se expresan en función de los valores medios de la velocidad, la densidad, y otras propiedades. El flujo a través de una tubería se puede considerar normalmente como un flujo unidimensional (Streeter, 2000).

### FLUJO BIDIMENSIONAL.

En un flujo bidimensional se supone que todas las partículas siguen trayectorias idénticas en planos paralelos, por consiguiente, no hay cambio en el flujo normal a dichos planos (Streeter, 2000). En este flujo se supone que todas las partículas fluyen sobre planos paralelos a lo largo de trayectorias (Gherardelli, 2008).

### FLUJO TRIDIMENSIONAL.

Este tipo de flujo es el más general en el que las componentes de velocidad en direcciones mutuamente perpendiculares son funciones de las coordenadas del espacio y del tiempo  $x, y, z, t$ . Los métodos de análisis son generalmente complejos matemáticamente y solo se puede resolver problemas que impliquen flujos entre contornos geométricos sencillos.

#### 2.1.2.5 En función de la velocidad angular.

### FLUJO IRROTACIONAL.

Son fluidos que se consideran ideales donde no existen tensiones cortantes, no tienen lugar movimientos rotacionales de las partículas fluidas alrededor de su propio centro de gravedad (Domingo, 2011).

### FLUJO ROTACIONAL.

En los flujos rotacionales la velocidad de cada partícula varía en proporción directa a la distancia del centro de rotación (Domingo, 2011).

$$\tau \propto \frac{dv}{dy} \quad (2.10)$$

Donde:

$\tau$  = Esfuerzo tangencial.

$\frac{dv}{dy}$  = Gradiente de velocidad.

### FLUIDOS NO NEWTONIANOS.

A diferencia del flujo Newtoniano en este flujo el gradiente de velocidad no es directamente proporcional al esfuerzo tangencial aplicado (Cengel & Cimbala, 2006). La investigación de Bagnold (1954), está concerniente con la alta concentración de mezclas de material sólido y líquido considerando el número adimensional  $N$ , que se expresa de la siguiente manera:

$$N = \frac{\rho_s \sqrt{A} d_{50}^3}{\mu} \left( \frac{dv}{dy} \right) \quad (2.11)$$

Donde:

$\rho_s$  = Densidad de las partículas.

$d_{50}$  = Diámetro de partículas que corresponden al 50% que pasa por el tamiz.

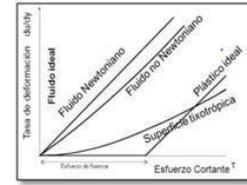
$\mu$  = Viscosidad dinámica.

$\frac{dv}{dy}$  = Gradiente de velocidad.

Se debe tomar en cuenta los valores de  $N$  que se muestran a continuación.

- $N < 40$  = Fluido macroviscoso, laminar.
- $N > 450$  = Fluido granulo inercial, turbulento.

FIGURA 2.14: Diagrama Reológico de fluidos.



Fuente: (Streeter y Wylie, 1971).

#### 2.1.2.6 En función a su régimen.

### FLUJO LAMINAR.

Las partículas forman capas o láminas desplazándose según trayectorias paralelas. La ley que relaciona la tensión cortante con la velocidad de deformación angular es la que gobierna este tipo de flujo (Domingo, 2011). Esta ley indica que la tensión cortante es igual al producto de la viscosidad del fluido, gradiente de las velocidades o bien  $\tau = \mu \frac{dv}{dy}$ . La viscosidad del fluido es la magnitud física predominante y su acción amortigua cualquier tendencia a la turbulencia (Rocha, 2015).

### FLUJO EN TRANSICIÓN.

A medida que aumenta la velocidad, se produce una transición del régimen laminar al turbulento.

### FLUJO TURBULENTO.

En este tipo de flujo las partículas se desplazan desordenadamente hacia todas las direcciones, haciendo imposible determinar la trayectoria individual de una partícula (Pérez & Renedo, 2012).

En el flujo turbulento la tensión cortante se puede definir de la siguiente forma:

$$\tau = (\mu + \eta) \frac{dv}{dy} \quad (2.12)$$

Donde:

$\tau$  = Esfuerzo cortante.

$\frac{dv}{dy}$  = Gradiente de velocidad.

$\eta$  = Factor que depende de la densidad del fluido y de las características del movimiento y los efectos debidos a la turbulencia.

$\mu$  = Efectos debidos a la viscosidad.

Las características del flujo turbulento son:

- Movimiento desordenado, aleatorio y caótico de forma irregular.
- La masa en la mezcla y disipación en su transporte, aumenta la difusividad.

- Inestabilidad de tiempo e inestabilidad tridimensional.

**2.2 ECUACIONES FUNDAMENTALES DE LA HIDRÁULICA.**

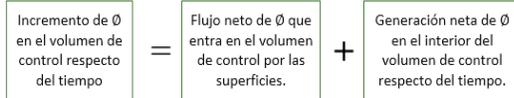
Las ecuaciones de gobierno de la Mecánica de fluidos, que describen la conservación de masa, momento o energía, están expresadas en términos de variables específicas o intensivas, es decir de cantidades expresadas por unidad de masa. A continuación, se citan los tres principios fundamentales que se aplican al flujo de fluidos:

- El principio de la conservación de la Masa, del cual parte la ecuación de Continuidad.
- El principio de conservación de la energía.
- El principio de la cantidad de Movimiento, del cual se deducen ecuaciones utilizadas para calcular las fuerzas dinámicas ejercidas por los fluidos en movimiento.

En resumen, se puede mencionar que de los principios de conservación de masa y la segunda ley de Newton, se obtiene las ecuaciones fundamentales de la hidráulica: la ecuación de continuidad, la ecuación de cantidad de movimiento. De la misma manera cuando a las ecuaciones de cantidad de movimiento o ecuaciones de Euler se combina con las ecuaciones constitutivas del fluido da como resultado la ecuación general del movimiento o ecuación de Navier Stokes (Monge, 2017).

**2.2.1 ECUACIÓN GENERAL DE TRANSPORTE.**

Al considerarse  $\phi$  como una variable específica definida sobre un volumen de control de dimensiones  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ . La variación temporal de la variable en dicho volumen de control se puede considerar a partir del principio de conservación" (Fernández, 2012) como:



Elaborado por: Jenny Carrera G, 2018.

**FIGURA 2.15:** Principio de Conservación de la materia.

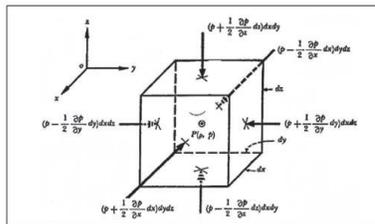


Elaborado por: Jenny Carrera.

El principio de conservación de masa menciona que: la masa no se crea ni se destruye, sino se conserva, se obtiene la ecuación de continuidad que indica en forma general el incremento de masa en el interior de un elemento fluido es consecuencia del flujo neto de masa hacia dicho elemento.

Para la deducción de la ecuación de continuidad se considera un elemento infinitesimal establecido por las longitudes  $dx, dy, dz$  paralelos a los ejes coordenados  $x, y, z$  de tal manera que en el centroide de la **FIGURA 2.16** se tenga la densidad  $\rho$  y la presión  $p$ . En las caras del elemento se muestra el incremento de la presión en magnitudes diferenciales generando las fuerzas indicadas.

**FIGURA 2.16:** Equilibrio de una partícula en reposo.



Fuente: (Sotelo, 1982)

Para un fluido en general la ecuación tridimensional de continuidad no estacionaria es:

Además teniendo en cuenta los dos mecanismos fundamentales de la generación de un flujo como son: la convección, la cual asocia el fluido a nivel macroscópico y la difusión, originado a nivel molecular o microscópico podemos obtener en forma vectorial la ecuación general de transporte como:

$$\frac{\delta(\rho\phi)}{\delta t} + \nabla * (\rho\vec{v}\phi) = \nabla * (\Gamma\nabla\phi) + S \tag{2.13}$$

La ecuación general (2.13) está formada por cuatro términos:

$\frac{\delta(\rho\phi)}{\delta t}$  **Término temporal.** Es el primer término de la ecuación que representa la variación local con el tiempo en el interior del volumen de control, es decir, la acumulación o disminución de  $\phi$ .

$\nabla * (\rho\vec{v}\phi)$  **Término convectivo.** El segundo término representa el transporte de la variable de un punto a otro del dominio por medio de la velocidad del flujo.

$\nabla * (\Gamma\nabla\phi)$  **Término difusivo.** Es el tercer término que se corresponde con alguno de los fenómenos de transporte que ocurre a nivel molecular: la ley de Fourier para la difusión de calor; la ley de Fick para la difusión de masa o la ley de Newton para la difusión de cantidad de movimiento por efectos viscosos (Fernández, 2012).

$S$  **Término fuente.** Para tener en cuenta fuentes de generación o destrucción de la variable transportada (Fernández, 2012).

**2.2.2 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD.**

Esta ecuación establece de forma general que el incremento de masa en el interior de un elemento fluido es consecuencia del flujo neto de masa hacia dicho elemento (Sotelo, 1982).

Según el principio de conservación de la masa, la cantidad neta de masa de flujo que entra es igual a la que sale en una unidad de tiempo (Sotelo, 1995).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \tag{2.14}$$

La ecuación anterior se expresa de forma vectorial de la siguiente manera:

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \nabla * (\rho \vec{V}) = 0 \tag{2.15}$$

Para el caso de un fluido incompresible, la densidad del fluido no varía temporal ni espacialmente en el dominio, por lo que la ecuación se reduce a que la divergencia de la velocidad debe ser nula:  $\nabla * \vec{V} = 0$ .

En el programa ANSYS – CFX la ecuación de continuidad de masa es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\gamma \alpha_q \rho_q) + \nabla * (\gamma \alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \gamma \sum_{p=1}^n (m_{pq} - m_{qp}) + \gamma S_q \tag{2.16}$$

Donde:

$\gamma$  = Porosidad.

$\rho_q$  = Densidad de fluido.

$\alpha_q$  = Volumen fraccional del fluido.

$\vec{v}_q$  = Vector velocidad del fluido.

$S_q$  = Término fuente.

$m_{pq}, m_{qp}$  = Transferencia de masa entre el punto o fase "p" al punto o fase "q" y viceversa.

Esta ecuación en forma vectorial es expresada por la siguiente ecuación.

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \nabla * (\rho U) = 0 \tag{2.17}$$

Donde:

$U$  = Vector de velocidad  $U_{x,y,z}$ .

**2.2.3 ECUACIÓN DE ENERGÍA.**

La ecuación de energía proviene del principio de conservación de energía. La energía interna y las energías debidas a la presión, a la velocidad y a su posición en el espacio conforman la energía que tiene un fluido en movimiento.

FIGURA 2.17: Balance de energía en dos secciones.



Elaborado por: Jenny Carrera.

La energía extraída y añadida, es el trabajo mecánico de un equipo o máquina que retira o adiciona energía para que el sistema funcione y la energía perdida puede producirse por fricción del flujo de fluido en tuberías o accesorios en el sistema.

Al considerar flujo a baja velocidad, incompresible y despreciando la disipación viscosa, la ecuación de la energía se expresa en términos de la entalpía específica (cantidad de energía de un sistema que éste puede intercambiar con su entorno) (Fernández, 2012), de la siguiente forma:

$$\frac{\delta(\rho h)}{\delta t} + \nabla * (\rho \vec{v}h) = \nabla * (k\nabla T) + S_h \quad (2.18)$$

Donde:

$K$  = Conductividad Térmica.

$T$  = Temperatura.

$\frac{\delta(\rho h)}{\delta t}$  = Térmico Temporal.

$S_h$  = Término Fuente.

El software **ANSYS – CFX** expresa la ecuación de la energía de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \gamma \rho_q h_q + (1 - \gamma) \rho_s h_s) + \nabla * (\gamma \alpha_q \rho_q \vec{v}_q h_q) \\ = -\gamma \alpha_q \frac{\partial p_q}{\partial t} + \gamma \vec{t}_q \cdot \nabla \vec{v}_q - \nabla * (\alpha_q (\gamma k_q + (1 - \gamma)k)) + \gamma S_q \quad (2.19) \\ + \gamma \sum_{p=1}^n (Q_{pq} + \dot{m}_{pq} h_{pq} - \dot{m}_{qp} h_{qp}) \end{aligned}$$

Donde:

$p, q$  = punto o fase.

$s$  = Material sólido

$h$  = Entalpía Total.

$k$  = Conductividad térmica.

$Q_{pq}$  = Transferencia de calor entre la fase "p" y la fase "q".

$\rho$  = Densidad del fluido

$S$  = Fuente de calor

$\alpha$  = Fase de fracción de volumen

$\vec{v}$  = vector velocidad

$h_{pq}, h_{qp}$  = Diferencia de la entalpía total entre la fase "p" y la fase "q" y viceversa.

Esta ecuación en forma vectorial es expresada de la siguiente manera.

$$\frac{\delta(\rho h_{tot})}{\delta t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla * (\rho \mathbf{U} h_{tot}) = \nabla * (\lambda \nabla T) + \nabla * (\mathbf{U} * \boldsymbol{\tau}) + \mathbf{U} * S_M + S_E \quad (2.20)$$

Donde:

$h_{tot}$  = Entalpía Total.

$\nabla * (\mathbf{U} * \boldsymbol{\tau})$  = Término de trabajo viscoso.

$\mathbf{U} * S_M$  = Trabajo debido a fuerzas externas de impulso.

$S_E$  = Término Fuente.

$\mathbf{U}$  = Vector de velocidad  $U_{x,y,z}$

## 2.2.4 ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO.

Esta ecuación proviene de la segunda ley de Newton en un volumen de control. La cantidad de movimiento es el producto de la masa de un elemento por su velocidad. La suma vectorial de todas las fuerzas que actúan sobre una masa de fluido es igual a la rapidez del cambio del vector lineal de la cantidad de movimiento de la masa de fluido (Fernández, 2012). La segunda ecuación de Newton está representada en la siguiente ecuación:

$$F = \frac{d(Mv)}{dt} \quad (2.21)$$

La ecuación considera el efecto de la gravedad como fuerza de un cuerpo, pero no toma en cuenta el efecto del esfuerzo cortante. Por tal restricción la ecuación se denomina ecuación de Euler.

$$-\frac{1}{\rho} \nabla p - g \nabla z = \left( u \frac{\partial V}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial y} + w \frac{\partial V}{\partial z} \right) + \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2.22)$$

El software **ANSYS – CFX** expresa la ecuación de cantidad de movimiento de la siguiente forma:

$$\frac{\delta(\rho \mathbf{U})}{\delta t} + \nabla * (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla * \boldsymbol{\tau} + S_M \quad (2.23)$$

Dónde:

$\rho$  = Densidad del fluido.

$\mathbf{U}$  = Vector de velocidad  $U_{x,y,z}$

$S_M$  = Fuentes de impulso.

## 2.2.5 ECUACIÓN DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO. NAVIER STOKES.

El científico Claude Navier (1785 – 1836), modifica las ecuaciones de Euler (1707-1783), para que abarque un fluido más realista al considerar la viscosidad debido a que en las ecuaciones de Euler no se consideró.

En 1842 el científico George Stokes (1819 – 1903) deduce las ecuaciones que se les conoce hoy en día como las ecuaciones de Navier Stokes.

Las ecuaciones de Navier Stokes son un conjunto de ecuaciones que describen los procesos de impulso, calor y transferencia de masa, dichas ecuaciones diferenciales parciales se derivaron a principios del siglo XIX y no tienen una solución analítica general conocida, pero pueden ser discretizadas y resueltas numéricamente. Otros procesos como la combustión pueden resolverse con ciertas ecuaciones, en conjunto con las ecuaciones de Navier-Stokes. Es de uso frecuente la utilización de un modelo aproximado para derivar estas ecuaciones adicionales, teniendo como ejemplo importante los modelos de turbulencia (Fernández, 2012). La ecuación de Navier Stokes en función de la velocidad del fluido y de algunos términos adicionales que el programa ANSYS – CFX emplea para resolver el movimiento del fluido se indica a continuación.

$$H(v - \vec{v}) + (1 - H)(-\nabla p + \nabla * T + \rho g - \rho a) = 0 \quad (2.24)$$

Dónde:

$H$  = Función de paso.

$v$  = Velocidad.

$\vec{v}$  = Velocidad local de la parte móvil.

$p$  = Presión del fluido.

$T$  = Tensor de corte.

$\rho g$  = Fuerza de volumen.

$\rho a$  = Término de la aceleración

Para los fluidos Newtonianos, el extra – stress tensor es definido por:

$$T = 2\eta(\gamma, T_e)D \quad (2.25)$$

Donde:

$T$  = Tensor.

$\eta$  = Viscosidad del fluido.

$\gamma$  = Tasa de participación.

$T_e$  = Temperatura.

$D$  = Tasa de deformación del tensor.

## 2.3 INTRODUCCIÓN A LA MODELACIÓN NUMÉRICA.

### 2.3.1 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD).

CFD se puede definir como el conjunto de herramientas del cálculo numérico aplicadas a la resolución de problemas fluido dinámicos, es decir mediante la Dinámica de Fluidos Computacional se logra simular el comportamiento de sistemas que involucran flujo de fluidos, transferencia de calor y otros procesos físicos relacionados. Se resuelven las ecuaciones de flujo de fluido sobre la región de estudio, con condiciones afines al mismo (conocidas del modelo físico) en el límite de esa región (Lozano, 2013).

Para una solución numéricamente aproximada es indispensable la discretización de las ecuaciones diferenciales en ecuaciones algebraicas que deben resolverse mediante los algoritmos apropiados desarrollados en su mayoría por computadores. El bajo coste que representa la simulación de modelos numéricos en comparación con ensayos de modelos a escala real o reducida se convierte en la principal ventaja que brinda la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

Además, mediante esta metodología se tiene la libertad para colocar condiciones de contorno y obtener la información de todas las variables en gran cantidad de puntos del espacio, algo complejo de realizar en modelos físicos. En ocasiones es complicado fijar los parámetros adimensionales en los experimentos para que coincidan con los que se requiere analizar, o cuando hay que imponer varios de ellos como por ejemplo los números de Reynolds y Froude (Lozano, 2013).

Las limitaciones que se puede mencionar en la Dinámica de fluidos computacional son: lo costoso que resulta solucionar todas las escalas de las ecuaciones de Navier – Stokes cuando el fluido está en régimen turbulento, lo que obliga a reducir el tamaño de la simulación usando modelos en las ecuaciones que pueden dar lugar a soluciones cualitativa y cuantitativamente incorrectas (pfc, 2004).

**2.3.1.1 Aplicaciones de la dinámica de fluidos computacional.**

A continuación, se mencionan algunos campos de la ingeniería donde ha sido aplicada la dinámica de fluidos computacional.

- ◆ Aerodinámica – aviones y automóviles.
- ◆ Servicios de construcción- ventilación de edificios, como atrios.
- ◆ Motores.
- ◆ Turbo máquinas – bombas y turbinas.
- ◆ Sistemas de calentamiento o enfriamiento.
- ◆ Salud y seguridad- investigar los efectos del fuego y el humo.
- ◆ Mezclas y reacciones químicas.
- ◆ Cargas de viento.
- ◆ Ingeniería medioambiental – transporte de efluentes líquidos y gaseosos.
- ◆ Hidrodinámica de embarcaciones.
- ◆ Hidráulica – Redes de tuberías, depósitos, canales, presas, etc.

**2.3.1.2 Proceso para la dinámica de fluidos computacional (CFD).**

El proceso para realizar una simulación CFD se divide en cuatro componentes:

a) Creación de la Geometría / Malla.

Esta es la primera etapa de pre procesamiento. Antes de generar una malla, se requiere un sólido geométrico cerrado. En el caso de fluidos, la geometría o el

volumen a estudiar también se puede extraer de un sólido en lugar de ser creada, además se puede importar la geometría desde algún paquete computacional CAD como por ejemplo Solid Works, Inventor entre otros, y a partir de ello generar automáticamente el volumen de control a simular. En ANSYS CFX el módulo de geometría cuenta con dos submódulos en los cuales se puede editar el sólido los cuales son: SpaceClaim y DesingModeler (Lozano, 2013).

Los pasos a seguir son:

1. Definir la geometría de la región de interés.
2. Crear regiones de flujo de fluidos, regiones solidas (paredes) y nombres de límites de superficie.
3. Establecer propiedades para la malla.

b) Definición de los parámetros físicos del modelo.

Es utilizado para crear la información requerida por el solucionador Solver. Los archivos de malla se cargan y guardan en el pre-procesador CFX-Pre, después se eligen los modelos físicos que se contendrán en la simulación, y además se detallan las propiedades del fluido y las condiciones de contorno (Lozano, 2013).

c) Resolución del problema CFD.

Solver es el componente que resuelve el problema de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), produce los resultados que se requieren en un proceso no iterativo (Giraldo, 2017). Para resolver un problema CFD se debe proceder de la siguiente manera:

1. Emplear una ley de conservación básica a cada volumen de control, ya que las ecuaciones diferenciales parciales están integradas en todos los volúmenes de control en la región de interés.
2. Las ecuaciones mencionadas en el punto anterior se convierten en un sistema de ecuaciones algebraicas, generando un conjunto de aproximaciones para los términos en las ecuaciones integrales.

3. Las ecuaciones algebraicas se desarrollan de manera iterativa.

Ya que la naturaleza de las ecuaciones es no lineal se requiere un enfoque iterativo, se dice que la solución se aproxima a ser exacta cuando esta llega a converger. Para cada iteración, se forma un residuo como una medida de la conservación general de las propiedades de flujo (Lozano, 2013).

Dependiendo de la forma de los volúmenes de control y el tamaño de los residuos finales se puede establecer una cercanía entre la solución final y la exacta. El solucionador crea un archivo de resultados que posteriormente se pasa al post-procesador, estos resultados se pueden observar en la opción **Display Monitors** en el módulo de Solver o Solution.

d) Visualizar los resultados en el post-procesador.

Es el componente que se utiliza para visualizar, analizar y presentar los resultados de forma interactiva. El post-procesador incluye la obtención de valores de puntos hasta complejas secuencias animadas (Lozano, 2013).

Dentro de las características de los post – procesadores se mencionan las más importantes:

- Visualización de la geometría y volúmenes de control.
- Gráficos vectoriales que muestran la dirección y la magnitud del flujo.
- Visualización de la variación de variables escalares (temperatura, presión, velocidad) a través del dominio.
- Cálculos numéricos cuantitativos.
- Animaciones
- Graficas de las variables.
- Copia impresa y salida en línea.

**2.3.1.3 Etapas de un análisis CFD.**

**Tabla 2.1** Etapas para un análisis CFD.

ETAPAS DE UN ANÁLISIS CFD	
ETAPA	DESARROLLO
Cálculos Previos	En esta etapa se debe formular el problema y plantear las ecuaciones que lo gobiernan, luego se deben establecer las condiciones de contorno y generar una malla. Los mencionado anteriormente depende del análisis que se realice (flujos, fuerzas, distribución de concentraciones, transferencia de calor entre otros) (Pachacama, 2015).
Solución de las ecuaciones	En esta etapa se produce la solución numérica de las ecuaciones que gobiernan el problema, es por ello que es la etapa más importante de la Dinámica Computacional de Fluidos (Lozano, 2013).
Análisis de resultados	La solución arroja resultados que se concierne al valor de las variables de campo ( $\rho, u, v, w, p, \dots$ ), en cada punto de la malla. Para manejar con facilidad y obtener resultados favorables del cálculo, se debe reducir la enorme cantidad de números a los fundamentales. Para obtener una visualización rápida y amena de los resultados obtenidos es fundamental la representación gráfica de las variables que gobiernan el flujo (Lozano, 2013).

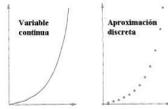
**2.3.1.4 Metodología para la discretización espacial.**

La discretización espacial del dominio constituye el primer paso en la aplicación de la dinámica de fluidos computacional. En la discretización espacial las posiciones discretas en las variables son calculadas y son definidas por la malla numérica, esta discretización divide el dominio en subdominios finitos que pueden ser elementos, volúmenes de control, nodos (Lozano, 2013). Discretización del flujo continuo quiere decir que las variables de campo ( $\rho, u, v, w, p, \dots$ ), se aproximan por un número finito de valores en puntos llamados nodos. Las ecuaciones de movimiento también se discretizan, esto quiere decir que son aproximadas en función de los valores en los nodos. Estas ecuaciones algebraicas se resuelven y se obtienen los valores de las variables en todos los nodos (Lozano, 2013).

ECUACIONES INTEGRALES  $\Rightarrow$  ECUACIONES ALGEBRAICAS  
(continuas) (discretas)

En la FIGURA 2.18. Se puede observar la discretización como una aproximación de una variable que es continua en un número finito de puntos.

FIGURA 2.18: Discretización de variables.

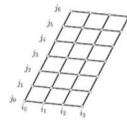


Fuente: (Illan, 2013).

Existen varias modelos de discretización entre las que tenemos diferencias finitas, volúmenes finitos, y elementos finitos, en este proyecto se utilizó el método de volúmenes finitos por tratarse de un fluido. Se requiere de una previa discretización geométrica (espacial) para realizar la discretización de las ecuaciones que gobiernan el fluido (Lozano, 2013). Para la discretización geométrica se puede utilizar dos tipos de mallas que se describen a breves rasgos a continuación:

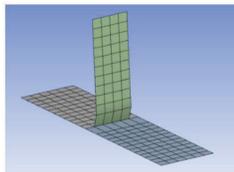
- Mallas estructuradas: Cada punto de la malla está identificada por los índices  $i, j, k$  en coordenadas cartesianas. Las celdas de la malla son cuadriláteros en 2 – D y hexaedros en 3 – D (Lozano, 2013).
- Mallas no estructuradas: Los nodos y las celdas no tienen un orden particular, los elementos de la malla son una mezcla de cuadriláteros y triángulos en 2 – D y tetraedros y hexaedros en 3 – D (Lozano, 2013).

FIGURA 2.19: Índices  $i, j$  en una malla estructurada.



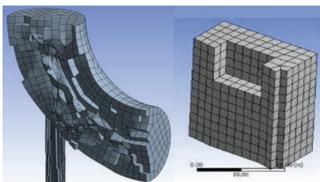
Fuente: (Illan, 2013).

FIGURA 2.21: Mallado Estructurado. Malla de cuadriláteros en 2 – D.



Fuente: (ANSYS- Help Viewer (Meshing User's Guide))

FIGURA 2.22: Malla estructurada. (Malla hexaedros 3 – D).



Fuente: (ANSYS- Help Viewer (Meshing User's Guide))

La ventaja de utilizar el mallado estructurado es que son fáciles de implementar, ya que equivale a mallas cartesianas mediante un cambio de coordenadas. Y la desventaja que presenta este mallado es que se puede utilizar más en dominios simples, además acumulan puntos en regiones que no son de interés (Lozano, 2013).

Entre los métodos de generación de malla estructurada se puede mencionar:

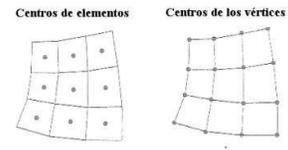
- Algebraicos: Se obtiene aplicando una transformación de coordenadas a geometrías canónicas simples.
- Basados en EDPs: Basados en la resolución de ecuaciones diferenciales parciales generalmente elípticas, con condición de contorno la geometría del dominio que se pretende discretizar.

El tipo de discretización espacial que se debe utilizar, depende del tipo de discretización de las ecuaciones empleadas y también de la estructura interna de datos empleados para resolver el flujo.

Generalmente es conveniente utilizar una malla estructurada de puntos en los que se almacenan las variables de flujo para el método de las diferencias finitas, que discretiza las ecuaciones de Navier - Stokes en forma diferencial (Lozano, 2013). En el método de volúmenes finitos se necesita definir puntos de control para cada volumen.

Es en los vértices donde se guardan las variables y dependiendo del método que se use serán definidos en el centro del elemento o en los vértices de las celdas como se muestra en la siguiente figura.

FIGURA 2.20: Mallas con nodos centrados en los elementos y en los vértices.



Fuente: (Illan, 2013).

2.3.1.5 Clasificación de mallas.

MALLADO ESTRUCTURADO

Las mallas estructuradas pueden representarse en un sistema cartesiano o curvilíneo, en el sistema cartesiano las líneas que conforman las celdas están siempre paralelas a los ejes coordenados y en el sistema curvilíneo las líneas que conforman las celdas se adaptan a la geometría de la estructura en estudio por tanto el sistema de coordenadas aparece deformado (Lozano, 2013).

En este tipo de mallado resulta más fácil y rápido el acceso a las celdas vecinas debido a la ordenación de los elementos. Estas mallas pueden clasificarse en:

- Mallas ortogonales.
- Mallas no ortogonales.

MALLADO NO ESTRUCTURADO

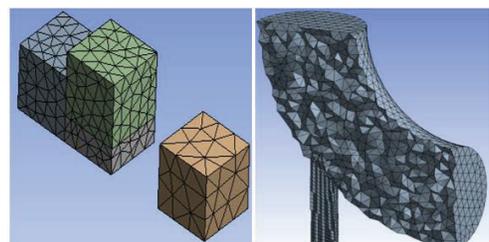
Este mallado brinda gran flexibilidad en el procesamiento de geometrías complejas, ya que los triángulos se pueden generar automáticamente, independientemente de la complejidad del dominio. Los nodos pueden estar situados en cualquier punto del espacio usando tetraedros y hexaedros.

El tiempo utilizado para generar una malla no estructurada es mucho menor que el que requiere una malla estructurada. La ventaja de este mallado es que los resultados obtenidos dependen del refinamiento que se realice en la malla, además este tipo de malla se adapta de mejor forma al dominio sin restricciones en cuanto al número de elementos vecinos ni nodos. Su desventaja es que presentan los algoritmos más complicados, los cálculos pueden ser menos eficientes a comparación de los de mallado estructurado (Lozano, 2013).

Entre los métodos de generación de malla no estructurada se puede mencionar:

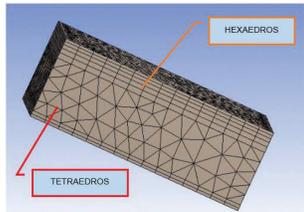
- Método Delaunay – Voronoi.
- Método de frente de avance.
- Método Multibloque.

FIGURA 2.23: Mallado no estructurado. (Tetraedros).



Fuente: (ANSYS- Help Viewer (Meshing User's Guide))

FIGURA 2.24: Mallado estructurado. (Tetraedros y Hexaedros).

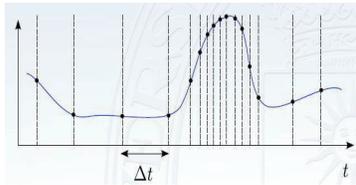


Fuente: ANSYS- Help Viewer (Meshing User's Guide)

2.3.1.6 Metodología para la discretización temporal.

En la discretización temporal la solución se obtiene en puntos discretos del tiempo. El paso de tiempo debe ser el adecuado para captar los cambios de la solución.

FIGURA 2.25: Discretización temporal.



Fuente: (Illan, 2013).

La discretización temporal se aplica a problemas de evolución definidos por ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden en el tiempo junto con las condiciones iniciales correspondientes. La idea de la discretización temporal es transformar la ecuación diferencial en una ecuación algebraica que podamos resolver con un computador (Aulestia, 2017).

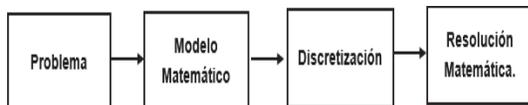
ecuaciones de conservación en su forma integral. Este método discretiza las ecuaciones en cada uno de los poliedros del dominio, en los que previamente se realiza una discretización espacial. La integral de superficie que aparece en el término de la derecha de la ecuación de Navier – Stokes completa, es aproximada por la suma de los flujos que atraviesan cada una de las caras del poliedro. Este método puede implementarse en mallas estructuradas y no estructuradas, es por ello que es el método más utilizado para la resolución de flujos con geometrías complejas (Gómez, 2007), (pfc, 2004).

El método de los volúmenes finitos se basa en la discretización directa de las ecuaciones de conservación de la masa, cantidad de movimiento y de energía. En el método de los volúmenes finitos la obtención de soluciones de las ecuaciones son débiles, al no existir una única solución débil, es necesario añadir la ecuación de la entropía a las ecuaciones de Euler (Gómez, 2007), (pfc, 2004).

La región de interés se divide en pequeñas subregiones, llamadas volúmenes de control. Las soluciones se discretizan y se resuelven de forma iterativa para cada volumen de control. Los resultados que se obtienen pueden ser una aproximación del valor de cada variable en puntos específicos a lo largo del dominio, así se obtiene una imagen completa del comportamiento del flujo (Gómez, 2007), (pfc, 2004).

En el siguiente esquema se puede observar el procedimiento que se debe llevar para una resolución numérica.

FIGURA 2.26: Proceso para una resolución matemática.



Fuente: (ANSYS- Help, 2016).  
Elaborado por: Jenny Carrera.

2.3.1.7 Metodología para la discretización de las ecuaciones.

MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS.

El primer método aplicado para obtener una solución numérica de unas ecuaciones diferenciales fue el método de diferencias finitas empleado por Euler en 1768. Este método utiliza el desarrollo de las series de Taylor para la discretización de las variables de flujo (pfc, 2004).

La ventaja de este método es su sencillez teórica y la posibilidad de aumentar la precisión del método al aumentar el orden de aproximación de las derivadas. Sin embargo, al requerir una malla estructurada el campo de aplicación se reduce a problemas con geometrías sencillas, además este método no puede aplicarse a coordenadas curvilíneas, por lo que se requiere transformar las ecuaciones de Navier – Stokes de curvilíneas a cartesianas para la resolución del problema (Gómez, 2007).

MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.

Este método fue estudiado por Tuner en 1956, se utilizó para el análisis estructural y años después se utilizó en resolución de ecuaciones de campo en medios continuos. El método de los elementos finitos, como método general para la resolución de las ecuaciones de Euler / Navier – Stokes, comienza con una división del dominio en elementos triangulares 2-D o tetraédricos 3-D formando una malla no estructurada. El número de variables del problema multiplicado por el número total de nodos se lo conoce como el número de grados de libertad del problema. Se debe definir también las funciones como distribuciones lineales de valor cero fuera del elemento correspondiente a la función, lo que permite una aproximación de segundo orden en la representación de resultados (Gómez, 2007), (pfc, 2004). Debido a la utilización de mallas no estructuradas en este método se puede emplear para flujos no Newtonianos, y para problemas con geometrías complejas.

MÉTODO DE LOS VOLÚMENES FINITOS.

Fue utilizado por primera vez por McDonald para la simulación de un problema 2-D no viscoso, la característica principal es que este método utiliza directamente las

Se presenta el siguiente cuadro resumen de las metodologías de discretización de las ecuaciones.

Tabla 2.2: Resumen de los tipos de discretización.

DISCRETIZACIÓN	FORMULACIÓN	MÉTODO
Método de diferencias finitas.	Usan formulación diferencial.	El dominio es cubierto por puntos llamados nodos, donde la ecuación es aproximada reemplazando las derivadas parciales por aproximaciones en términos de los valores nodales de la función. En geometrías simples con mallas estructuras son sencillos y efectivos.
Método de elementos finitos	Usan formulación débil.	La solución es aproximada en cada uno de los elementos que está dividido el dominio, utilizando los valores de la función en los vértices del elemento. Dicha aproximación es sustituida en la ecuación integral con respecto al valor en cada nodo sea cero.
Método de volúmenes finitos.	Usan formulación integral de las ecuaciones	Se aplican las ecuaciones integrales en el dominio que está dividido en volúmenes de control. Se pueden utilizar con facilidad en geometrías complejas. Presentan dificultad de obtener esquemas de alto orden.

Fuente: ANSYS- Help Viewer (Meshing User's Guide)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

2.3.1.8 Resolución de las ecuaciones.

El conjunto de ecuaciones que describen los procesos de impulso, calor y masa se conocen como las ecuaciones de Navier Stokes. A menudo se utiliza un modelo aproximado para derivar éstas ecuaciones siendo los modelos de turbulencia un ejemplo particularmente importante. Hay varios métodos de solución diferentes que se utilizan en los códigos CFD. El más común y el que se basa CFX, se conoce como la técnica de volumen finito. En ésta técnica la región en cuestión se divide en sub regiones llamadas volúmenes de control. Las ecuaciones están discretizadas y resueltas iterativamente para cada volumen de control. Como resultado se puede obtener una aproximación del valor de cada variable en puntos específicos en todo el dominio. De esta manera se deriva una imagen completa del comportamiento del flujo (Ansys - Help, 2016).

### 2.3.2 BREVE INTRODUCCIÓN SOBRE LA MODELACIÓN DE LA TURBULENCIA: USOS Y RESTRICCIONES.

#### TURBULENCIA.

La turbulencia es un comportamiento caótico y desordenado que depende del tiempo, generalmente presente en todos los flujos. Se cree que es debido a la inercia de fluido, la culminación de la dependencia del tiempo y la aceleración convectiva. En flujos donde los efectos de la inercia son pequeños, tienden a ser laminares, puesto que en los flujos laminares las fuerzas viscosas son proporcionalmente más fuertes que las fuerzas de inercia. El número que cuantifica el efecto de las fuerzas viscosas y las fuerzas inerciales se denomina número de Reynolds.

Las ecuaciones de Navier – Stokes describen la turbulencia apropiadamente ya que los modelos Reynolds – Navier Stokes resuelven estos complejos flujos de turbulencia al modelar la turbulencia como fluctuaciones dentro de un campo de velocidad promedio constante, estos modelos no son exactos, pero se han ajustado para proporcionar una precisión razonable.

La solución numérica de las ecuaciones de Navier – Stokes para flujos turbulentos es compleja por las diferencias significativas en la escala de mezcla – longitud contenida en un flujo turbulento. Para obtener una solución estable de las ecuaciones estudiadas se requiere una discretización muy fina.

Al depender la turbulencia del tiempo se requiere realizar una discretización temporal en lapsos de tiempo de alrededor 100 microsegundos por lo que se requeriría un tiempo computacional extremadamente alto, por lo que resulta un estudio complejo. Para reducir este problema al modelar flujos turbulentos en un esquema práctico de CFD, se usan ecuaciones como RANS (Reynolds – Averaged Navier Stokes) (Pachacama, 2015).

#### 2.3.2.1 Ecuaciones de Reynolds / Averaged Navier Stokes - (RANS)

Estas ecuaciones son la aproximación más antigua para modelar turbulencia. Las ecuaciones de continuidad y momento de Navier Stokes se resuelven promediando

un conjunto de las mismas, esto evita calcular los pequeños vórtices de turbulencia en todo el flujo.

Se puede realizar el cálculo de los procesos de turbulencia, tomando en cuenta los términos promediados en función del tiempo de las ecuaciones de continuidad y momento, y realizar el cálculo de fluctuaciones turbulentas de flujos incompresibles en función de velocidades medias, presiones medias, esfuerzos medios entre otras características hidráulicas. Por ejemplo la velocidad,  $U_i$  puede dividirse en una componente promedio,  $\bar{U}_i$  y una componente variable en el tiempo,  $u_i$ .

$$U_i = \bar{U}_i + u_i \quad (2. 26)$$

La componente promediada viene dada por:

$$\bar{U}_i = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} U_i dt \quad (2. 27)$$

Donde  $\Delta t$  es la escala de tiempo que con relación a las fluctuaciones turbulentas es grande, pero pequeña en relación con la escala de tiempo a la que se resuelven las ecuaciones. Cuando se trata de flujos compresibles, el promediado se pondera por densidad, pero en la siguiente ecuación se consideran las fluctuaciones de densidad insignificantes. Las ecuaciones se promedian en conjunto para flujos transitorios, a estas ecuaciones se las conoce como URANS (ecuaciones de Navier – Stokes promediadas de Reynolds inestables. Si se sustituyen las cantidades promediadas en las ecuaciones de transporte originales se obtiene las ecuaciones promedio de Reynolds que se muestran a continuación.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (2. 28)$$

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j) + S_M \quad (2. 29)$$

Donde:

$\tau$  = Esfuerzo cortante

Las ecuaciones de impulso y transporte escalar contienen términos de flujo

turbulento adicionales a los flujos difusivos moleculares. Estas son las tensiones de Reynolds,  $\rho \bar{u}_i \bar{u}_j$ . Estos términos surgen del término convectivo no lineal en las ecuaciones no promediadas. Indican el hecho de que el transporte convectivo debido a las fluctuaciones de velocidad turbulenta actuará para mejorar la mezcla por encima de la causada por las fluctuaciones térmicas a nivel molecular. A altos números de Reynolds, las fluctuaciones de velocidad turbulenta ocurre en una escala de longitud mucho más grande que la trayectoria libre media de las fluctuaciones térmicas, de modo que los flujos turbulentos son mucho más grandes que los flujos moleculares (Ansys - Help, 2016).

La ecuación de energía promedio de Reynolds es:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j h_{tot}) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} - \rho \bar{u}_j \bar{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} [U_i (\tau_{ij} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j)] + S_E \end{aligned} \quad (2. 30)$$

Esta ecuación contiene un término de flujo de turbulencia adicional  $\rho \bar{u}_j \bar{h}$ , en comparación con la ecuación instantánea. El término en la ecuación  $\frac{\partial}{\partial x_j} [U_i (\tau_{ij} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j)]$ , es el término de trabajo viscoso que se puede incluir habilitando viscosidad en CFX – Pre.

La entalpía está dada por:

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} U_i U_i + k \quad (2. 31)$$

Se debe tener en cuenta que la entalpía total contiene una contribución de energía cinética turbulenta  $k$  dada por:

$$k = \frac{1}{2} \bar{u}_i^2 \quad (2. 32)$$

De manera similar, la variable adicional  $\phi$  se puede dividir en un componente promedio  $\bar{\phi}$ , y un componente variable en el tiempo  $\phi$ . Después de dejar caer la barra para cantidades promediadas, excepto para productos de cantidades fluctuantes, la ecuación de la Variable Adicional se convierte en:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} - \rho \bar{u}_j \bar{\phi} \right) + S_\phi \quad (2. 33)$$

Los modelos de turbulencia cierran las ecuaciones promediadas de Reynolds al proporcionar modelos para el cálculo de las tensiones de Reynolds y los flujos de Reynolds. Los modelos CFX se pueden dividir en dos clases: modelos de viscosidad y modelos de tensiones de Reynolds.

#### 2.3.2.2 Modelos de turbulencia.

##### • MODELO DE TURBULENCIA $\kappa - \epsilon$ .

Se ha comprobado la eficacia del modelo  $\kappa - \epsilon$  aplicando a flujos circulares, flujos confinados con esfuerzos cortantes de Reynolds significativos, las ventajas de este modelo es que requiere poca demanda computacional y una óptima convergencia para su solución (Ansys - Help, 2016). De las ecuaciones que se describen a continuación se puede mencionar que,  $k$  es la energía cinética de la turbulencia y se define como la varianza de las fluctuaciones en la velocidad,  $\epsilon$  es la disipación del remolino de turbulencia (la velocidad a la que se disipan las fluctuaciones de velocidad). El modelo  $\kappa - \epsilon$  introduce nuevas variables en el sistema de ecuaciones. La ecuación de continuidad es entonces:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (2. 34)$$

La ecuación de momento se convierte en:

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M \quad (2. 35)$$

Donde  $S_M$ , es la suma de las fuerzas del cuerpo,  $\mu_{eff}$  es la viscosidad de la turbulencia, y  $\bar{p}$  es la presión modificada que se indica en la siguiente ecuación:

$$\frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \quad (2. 36)$$

El modelo  $\kappa - \epsilon$  se basa en el concepto de viscosidad de remolino de modo que:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (2.37)$$

Donde  $\mu_t$  es la componente de la velocidad fluctuante en flujo turbulento,  $\mu_t$ , es la viscosidad de la turbulencia, este modelo asume que la viscosidad de la turbulencia está relacionada con la energía cinética de la turbulencia y la disipación a través de la siguiente ecuación:

$$\mu_t = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.38)$$

Donde  $C_{\mu}$ , es una constante. Los valores de  $k$  y  $\varepsilon$  provienen directamente de las ecuaciones de transporte diferencial para la energía cinética de turbulencia y la tasa de disipación de turbulencia:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb} \quad (2.39)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{\varepsilon b}) \quad (2.40)$$

Donde  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$ ,  $\sigma_\varepsilon$ , y  $\sigma_k$  son constantes,  $P_{kb}$  y  $P_{\varepsilon b}$ , representan la influencia de las fuerzas de flotación que se muestran a continuación,  $P_k$ , es la producción de turbulencia debido a las fuerzas viscosas.

$$P_k = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \left( 3\mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} + \rho k \right) \quad (2.41)$$

Para flujo incompresible  $\frac{\partial U_k}{\partial x_k}$  es pequeño y el segundo término en el lado derecho de la ecuación anterior no contribuye significativamente a la producción. En el caso de un flujo compresible  $\frac{\partial U_k}{\partial x_k}$  solo es grande en regiones con alta divergencia de velocidad, como en choques.

El término  $3\mu_t$  que se muestra en la ecuación anterior se basa en el supuesto de estrés congelado. Esto evita que los valores de  $k$  y  $\varepsilon$  se vuelvan demasiado grandes a través de los golpes, una situación que se vuelve progresivamente peor a medida que la malla se refina en los choques (Ansys - Help, 2016).

un modelo con un número bajo de Reynolds en el modelo  $k - \omega$  requeriría menos  $y^+ < 2$ . El modelo en estudio permite un cambio suave de una forma de número de Reynolds baja a una formulación de función de pared (Ansys - Help, 2016).

El modelo  $k - \omega$  asume que la viscosidad de la turbulencia está relacionada con la turbulencia, la energía cinética y la frecuencia turbulenta a través de la relación:

$$u_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (2.46)$$

El punto de partida de las formulaciones actuales es el modelo desarrollado por Wilcox, el cual resuelve dos ecuaciones de transporte, una para la energía cinética turbulenta y otra para la frecuencia turbulenta. El tensor de tensión se calcula por el concepto de viscosidad de remolino.

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + P_{\omega b} \quad (2.47)$$

Adicionalmente de las variables independientes, la densidad y el vector de velocidad  $U$ , se tratan como cantidades conocidas del método de Navier- Stokes.  $P_k$ , es la tasa de producción de turbulencia, que se calcula como se mencionó anteriormente en el modelo  $k - \varepsilon$ .

Las constantes del modelo están dadas por:

$$\begin{aligned} \beta^* &= 0.09 \\ \alpha &= 5/9 \\ \beta &= 0.075 \\ \sigma_k &= 2 \\ \sigma_\omega &= 2 \end{aligned}$$

El tensor de Reynolds desconocido se calcula de la siguiente manera:

$$-\rho \overline{u_i u_j} = u_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \partial_{ij} \left( \rho k + u_t \frac{\delta U_k}{\delta x_k} \right) \quad (2.48)$$

#### • MODELO DE TURBULENCIA Shear Stress Transport (SST) Model.

El modelo de transporte de esfuerzo cortante (SST) está basado en el transporte de la tensión de cizalladura turbulenta y ofrece predicciones muy precisas del inicio y la cantidad de separación de flujo bajo gradientes de presión adversa. Los

#### • MODELO DE TURBULENCIA RNG $k - \varepsilon$ .

Este modelo se basa en el análisis de grupo de renormalización de las ecuaciones de Navier Stokes. Las ecuaciones de transporte para la generación y disipación de turbulencia son las mismas que para el modelo estándar, pero las constantes del modelo difieren, y la constante  $C_{\varepsilon 1}$ , se reemplaza por la función  $C_{\varepsilon 1RNG}$ .

La ecuación de transporte para la disipación de turbulencia se transforma en:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \varepsilon) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon RNG}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \\ &+ \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1RNG} P_k - C_{\varepsilon 2RNG} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1RNG} P_{\varepsilon b}) \end{aligned} \quad (2.42)$$

Donde:

$$C_{\varepsilon 1RNG} = 1.42 - f_\eta \quad (2.43)$$

$$f_\eta = \frac{\eta \left( 1 - \frac{\eta}{4.38} \right)}{(1 + \beta_{RNG} \eta^3)} \quad (2.44)$$

$$\eta = \frac{P_k}{\rho C_{\mu RNG} \varepsilon} \quad (2.45)$$

Donde:

$C_{\varepsilon 1RNG}$  = Coeficiente del modelo de turbulencia RNG  $k - \varepsilon$ .

$C_{\mu RNG}$  = Constante del modelo de turbulencia RNG  $k - \varepsilon = 0.085$ .

$C_{\varepsilon 2RNG}$  = Constante del modelo de turbulencia RNG  $k - \varepsilon = 1.68$ .

$f_\eta$  = Coeficiente del modelo de turbulencia RNG  $k - \varepsilon$ .

#### • MODELO DE TURBULENCIA $k - \omega$ .

Una de las ventajas de este modelo es el tratamiento de pared cercana para cálculos con números bajos de Reynolds. Este modelo no involucra las complejas funciones de amortiguación no lineal requeridas para el modelo  $k - \varepsilon$ , y por consiguiente, es más preciso y más robusto. Un modelo Reynolds  $k - \varepsilon$  bajo normalmente requeriría una resolución de pared cercana de  $y^+ < 0.2$ , mientras que

modelos anteriores no tienen en cuenta el transporte de la tensión de cizalladura turbulenta, y sobre predicen la viscosidad de remolino.

El comportamiento de transporte adecuado se puede obtener mediante un limitador a la formulación de la viscosidad de remolino (Ansys - Help, 2016).

$$v_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)} \quad (2.49)$$

$$v_t = u_t / \rho \quad (2.50)$$

$F_2$ , se trata de una función de mezcla similar a  $F_1$ , que restringe el limitador a la capa límite de la pared, ya que las suposiciones subyacentes no son correctas para flujos de corte libre.  $S$  es una medida invariante de la tasa de deformación.

El plazo de producción está dado por:

$$P_\omega = \left( \frac{\alpha_3}{v_t} \right) P_k \quad (2.51)$$

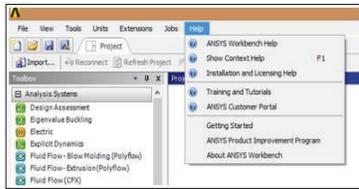
### 2.3.3 PROGRAMA ANSYS.

ANSYS, Inc., es uno de los líderes mundiales desarrolladores de software de simulación en ingeniería basado en el método de volumen finito y elemento finito aplicado a una malla. Esta tecnología ofrece un gran número de modelos físicos que pueden ser aplicados a una gran variedad de ramas de la ingeniería (Ansys - Help, 2016).

ANSYS, Inc., posee una paquetería completa para la simulación, comenzando con un módulo de dibujo en 3D, modelos matemáticos y esquemas de solución, un módulo para crear cualquier tipo de malla y un paquete de post- procesamiento.

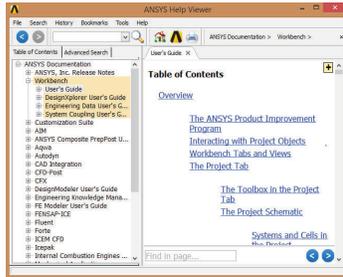
ANSYS, Inc., cuenta con un módulo de ayuda llamado ANSYS Help, que permite al usuario despejar las dudas que se presenten durante el proceso de simulación, además se puede obtener la información de cualquier tipo de estudio a realizar (Ansys - Help, 2016).

FIGURA 2.27: ANSYS Help.



Fuente: (ANSYS - Help Viewer)

FIGURA 2.28: Contenido de ANSYS Help.



Fuente: (ANSYS - Help Viewer)

### 2.3.3.1 Ansys Workbench

ANSYS Workbench se utiliza para realizar distintos tipos de análisis como: Análisis estructurales, térmicos, de fluidos y electromagnéticos entre otro tipo de análisis. ANSYS Workbench contiene conectividad CAD bidireccional, mallado, mecanismo de actualización a nivel de proyecto, administración de parámetros generalizada y herramientas de optimización integradas.

Tiene un espacio de trabajo principal del proyecto que se denomina pestaña Proyecto. Cuando se requiere crear un análisis se debe agregar bloques de

construcción denominados Esquema del proyecto, estos sistemas conforman un diagrama de flujo que representa el flujo de datos a través de su proyecto. Cada sistema es un conjunto de células al que se denomina bloque, estas células representan los pasos secuenciales que se requieren para el tipo específico de análisis. Estos sistemas pueden ser vinculados para compartir o transferir datos entre sistemas (Ansys - Help, 2016).

FIGURA 2.29: ANSYS-CFX.



Fuente: (ANSYS - CFX.)

**Celdas del Esquema del proyecto:** Desde estas celdas se puede trabajar con varias aplicaciones de ANSYS y tareas de análisis, que se abren en pestañas dentro del entorno de Workbench, sin embargo, hay otras celdas que se pueden abrir independientemente en sus propias ventanas.

En el entorno de Workbench se puede gestionar los parámetros a nivel de proyecto, trabajando a través de las celdas de cada sistema, definiendo las entradas, especificando los parámetros del proyecto, ejecutando su simulación e investigando los resultados.

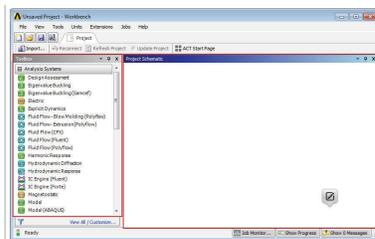
Workbench permite investigar rápida y fácilmente las alternativas de diseño, ya que se puede modificar cualquier parte de un análisis o variar uno o más parámetros, y después actualizar automáticamente el proyecto para ver el efecto del cambio en el resultado de la simulación. La interfaz de Workbench posee elementos de la interfaz, llamados pestañas y vistas (Ansys - Help, 2016).

**Pestañas del banco de trabajo:** Estas pestañas sirven como espacios de trabajo que le permiten interactuar como diferentes partes de su proyecto. Las pestañas en

Workbench están conformadas por vistas múltiples que contienen información importante para una parte del análisis que se indica en la pestaña, cada una de estas pestañas tienen una barra de herramientas que contiene botones para las operaciones que están disponibles (Ansys - Help, 2016).

Los sistemas se agregan de izquierda a derecha y de arriba a abajo, toda transferencia de datos sucede desde la izquierda hasta la derecha, no se pueden transferir datos, al contrario. Por ende, es importante ubicar los sistemas de recepción a la derecha de los sistemas de envío. Las actualizaciones de los sistemas también ocurren de izquierda a derecha y de arriba abajo. La mayoría de los sistemas de análisis están definidos por tres atributos: tipo de física, tipo de análisis y tipo de solucionador, los mismos se utilizan para determinar la transferencia de datos válida y las posibilidades de reemplazo del sistema (Ansys - Help, 2016).

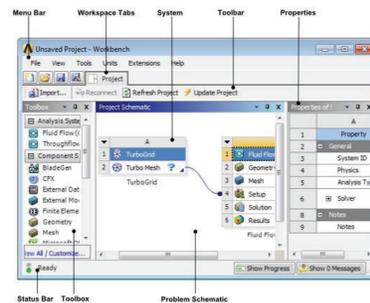
FIGURA 2.30: Interfaz de ANSYS-Workbench.



Fuente: (ANSYS-CFX Help)

La interfaz ANSYS Workbench posee un grupo de componentes que ayuda a resolver problemas particulares. Después de elegir un sistema de la caja de herramientas y moverlo al Esquema del Proyecto, las características de soporte como las propiedades y mensajes ayudan en la orientación de la información (Ansys - Help, 2016).

FIGURA 2.31: Esquema del Proyecto en ANSYS Workbench.



Fuente: (ANSYS Workbench - Help.)

En la figura anterior se indica un sistema de componentes TurboGrid y un sistema de análisis Fluid Flow CFX abierto y vinculados entre sí. La ventana de Workbench posee algunos componentes como:

- Menu Bar.
- Workspace Tabs.
- System
- Toolbar
- Properties
- Status Bar
- Toolbox
- Problem Schematic.

### SISTEMAS DE ANSYS WORKBENCH.

Los sistemas que están disponibles en las pestañas de herramientas del proyecto se dividen en las siguientes categorías.

- **SISTEMAS DE ANÁLISIS.** Son sistemas completos con todas las células, componentes necesarias ya definidas y listas para ser pobladas.

- **SISTEMAS DE COMPONENTES.** Son componentes básicos que representan solo un subconjunto de un análisis completo. Por ejemplo, pueden usar un sistema de componentes Geometry para definir su geometría y luego conectar el sistema de componentes a varios sistemas descendentes, y que estos a su vez compartan la misma fuente de geometría (Ansys - Help, 2016).
- **SISTEMAS PERSONALIZADOS.** Son un conjunto de plantillas predefinidas para sistemas acoplados personalizados, compuestos de múltiples sistemas de análisis con conexiones de datos predefinidas (Ansys - Help, 2016).
- **EXPLORACIÓN DE DISEÑO:** Los sistemas Design Xplorer se pueden agregar debajo de la barra de conjunto de parámetros lo que le permite realizar varios estudios de exploración de diseño (Ansys - Help, 2016).

2.3.3.2 Ansys CFX.

ANSYS CFX es un paquete de software de CFD (Dinámica de Fluidos Computacional), que dispone de un avanzado solucionador con poderosas capacidades de procesamiento previo y post-proceso.

Este paquete computacional posee las características que se mencionan a continuación:

- Solucionador acoplado avanzado que es confiable y robusto.
- Posee una integración completa de definición de problemas, análisis y presentación de resultados.
- Un proceso de configuración intuitiva e interactiva, utilizando menús y gráficos avanzados.

En ANSYS CFX se puede modelar:

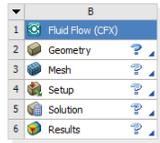
- Flujos estacionarios y transitorios.
- Flujo laminar y turbulentos.
- Flujos subsónicos, transónicos y supersónicos.
- Transferencia de calor y radiación térmica.
- Flotabilidad.
- Flujos no newtonianos.
- Transporte de componentes escalares que no reaccionan.

FIGURA 2.33: Procesos en ANSYS CFX.



Fuente: (Pachacama, 2015)  
Elaborado por: Jenny Carrera G.

FIGURA 2.34: Módulos de ejecución en ANSYS CFX.



Fuente: (ANSYS - CFX).

MÓDULO DE PRE-PROCESO

CFX-Pre se utiliza para definir simulaciones. Se pueden usar múltiples mallas, lo que permite que cada sección de geometrías complejas, utilice la malla más adecuada para dicha sección.

En este módulo se especifican los análisis que consisten en la física del flujo, las condiciones de contorno (entradas, salidas, aberturas, condiciones de contorno para los modelos de transferencia de calor, la periodicidad, los valores iniciales, los parámetros del solucionador.)

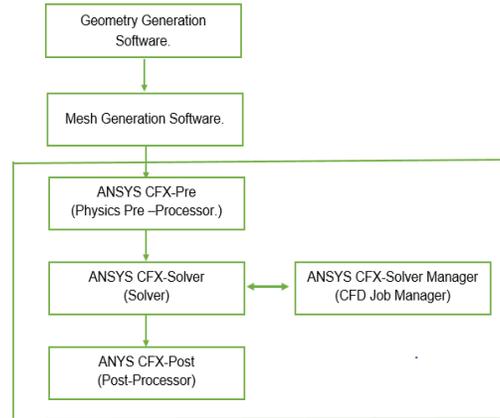
El módulo de Pre- Proceso o Setup es una interfaz de ANSYS-CFX en el cual se seleccionan los parámetros, ecuaciones, esquemas numéricos de solución,

- Flujos multifásicos.
- Combustión.
- Flujos en múltiples marcos de referencia.
- Seguimiento de partículas.

2.3.3.3 Módulos de ejecución de ANSYS.

ANSYS CFX consta de cuatro módulos de software que toman una geometría y malla y pasan la información requerida para realizar un análisis de CFD. En la siguiente figura se muestran los módulos de ejecución de ANSYS – CFX (Ansys - Help, 2016).

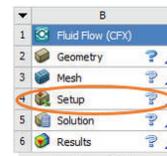
FIGURA 2.32: Estructura de ANSYS CFX.



Fuente: (ANSYS – CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera G.

modelos de turbulencia, para realizar la simulación. El Setup cuenta con diversas opciones de simulación, tales como esquema de solución (basados en presión o en densidad), estado de flujo, (estacionario o transitorio), modelos de turbulencia (k-e, k-w, Reynolds Stress entre otros) esquemas de solución (PRESTO, SIMPLE, SIMPLEC, entre otros.), aquí también se seleccionan los pasos de tiempo en los que se va a llevar a cabo la simulación, el número de iteraciones, etc. En este módulo se estudia como importar mallas producidas en una variedad de software de generación de malla y cómo seleccionar los modelos físicos que se necesiten usar en la simulación de CFD de este proyecto (Ansys - Help, 2016).

FIGURA 2.35: Pre-procesador / SETUP.



Fuente: (ANSYS - CFX).

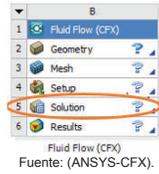
MÓDULO SOLVER

CFX-Solver resuelve todas las variables de solución para la simulación del problema generado en CFX-Pre.

En el solucionador acoplado que posee ANSYS CFX, se resuelven las ecuaciones hidrodinámicas como un único sistema. Este solucionador es más eficiente que el solucionador tradicional segregado ya que se requieren menos iteraciones para que la solución converja. El módulo de CFX-Solver detalla los modelos físicos utilizados en CFX, los cuales pueden ser de tipos básicos hasta los modelos físicos más avanzados, y cómo los modelos básicos se amplifican a casos más complejos (Ansys - Help, 2016).

**CFX-Solver Manager.** Este módulo proporciona un mayor control para la gestión de la tarea CFD.

FIGURA 2.36: ANSYS CFX- SOLVER.



### MÓDULO POST-PROCESO

En este módulo incluye la extracción de las propiedades del flujo (sustentación, velocidad, presiones, velocidad, turbulencia, etc.) del campo de flujo analizado y calculado computacionalmente.

La paquetería de ANSYS cuenta con un módulo de post-procesamiento denominado ANSYS-Results, donde una vez obtenidos los resultados en CFX, estos pueden ser exportados a un visualizador de datos dentro de ANSYS-Results, los cuales podrán ser interpretados mediante gráficos para facilitar la comprensión del comportamiento de los campos de velocidad, turbulencia, presión, y demás parámetros que se requiera estudiar, además los resultados pueden ser exportados en distintos formatos para su debido tratamiento de datos mediante software como Excel, TecPlot entre otros (Ansys - Help, 2016).

Este módulo presenta herramientas gráficas de Post - procesamiento interactivo para presentar los resultados de la simulación ANSYS CFX.

Este módulo presenta las siguientes características:

- Generación de informes.
- Línea de comando, archivo de sesión o entrada de archivo de estado.
- Variables definidas por el usuario.
- Generación de una variable de objetos gráficos, (visibilidad, transparencia, color, representación de línea)
- Power Syntax para permitir archivos de sesión completamente programables.

adicionales. Para la escala de tiempo en este estado estacionario el programa CFX, aplica un paso de tiempo falso para de esta manera relajar las ecuaciones a medida que avanza a la solución final, es común elegir una escala de tiempo grande para que la convergencia en este estado estable sea más rápida, ya que al elegir una escala de tiempo pequeña la convergencia a la solución final será muy lenta.

Generalmente se requiere que las iteraciones de bucle en este tipo de análisis estén entre 50 y 100 para alcanzar la convergencia. Si no se alcanza la convergencia se puede aumentar el número de iteraciones bucle (Ansys - Help, 2016).

#### Análisis transitorio.

Este tipo de análisis se usan al modelar flujos que dependen del tiempo. Para este análisis se debe establecer la duración de tiempo y pasos de tiempo (time steps). Los pasos de tiempo pueden aceptar un solo valor o listas de valores, si se ingresa una lista ésta deberá estar separada por comas. La duración de tiempo es un límite especificado por el usuario en la duración del tiempo real que la simulación debe realizarse, se usa para indicar cuando terminar la ejecución transitoria, mientras que el time step es una forma de rastreo del progreso del tiempo real durante la simulación (Ansys - Help, 2016).

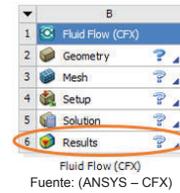
**Análisis de fila de alabe transitorios.** Es un tipo de análisis transitorio que se adapta cuando se trata de turbomáquinas.

#### 2.3.4.3 Mallado del dominio de estudio.

El dominio en estudio en este caso se discretiza en una malla a través de volúmenes finitos. La creación de la malla implica la definición de la estructura y topología y luego la generación de la cuadrícula de dicha topología. En la actualidad la mayoría de las mallas son estructuradas con multibloques, sin embargo, pueden existir mallas contiguas, no contiguas y con superposición.

La malla a simular debe tener una calidad en su cuadrícula la cual se definirá en los literales posteriores. Es importante que se tome en consideración la calidad de la malla en zonas donde se requiera ver los fenómenos de capa límite, donde se

FIGURA 2.37: ANSYS-CFX POST-PROCESADOR.



### 2.3.4 MÉTODO DE RESOLUCIÓN NUMÉRICA EN ANSYS SECUENCIA Y ESTRUCTURA.

#### 2.3.4.1 Construcción de la geometría.

La geometría para cualquier tipo de estudio puede ser generada en los módulos que ofrece ANSYS para la creación de la geometría los cuales son ANSYS-DesingModeler, o SpaceClaim, o por otro lado la geometría puede ser creada en cualquier otro programa CAD, y se la puede importar directamente. Luego de importar la malla al preprocesador, se definen otros elementos de la simulación que incluyen las condiciones de contorno y las propiedades del fluido (Ansys - Help, 2016).

#### 2.3.4.2 Tipo de análisis a simular.

En el procesador Solver se tiene una configuración de tipo de análisis donde se especifica qué tipo de análisis se va a realizar, para el caso de fluidos se puede realizar un análisis:

- Steady State (Estado Estable)
- Trasient (Transitorio)
- Trasiente Blade Row (Fila de hoja transitoria)

#### Análisis Estado estable.

Los análisis de estado permanente o estable se utilizan para modelar flujos que no cambian con el tiempo. Este tipo de análisis no necesita de configuraciones

deben considerar espesores muy finos en las capas que conforman dicha capa límite (Ansys - Help, 2016).

ANSYS posee un módulo muy completo llamado Ansys - Meshing, es donde se puede realizar la discretización del dominio a modelar. Esto se lo realiza por medio de fragmentos del sólido en pequeños elementos llamados volúmenes finitos, los mismos que pueden ser de tipo: hexaédrico, prismático, tetraédrico y piramidal. Con ciertas combinaciones de estas formas se puede llevar a cabo la fragmentación de la geometría, ajustando dichos elementos a la topología del dominio a modelar.

La convergencia de los resultados depende de la calidad de la malla utilizada para la simulación por lo cual el módulo ANSYS - Meshing proporciona una variedad de escalas y métodos para evaluar la calidad de los elementos que forman parte de dicha malla (Ansys - Help, 2016).

#### RELEVANCIA.

El estado de relevancia significa tomar en cuenta u obviar propiedades de la geometría en análisis, la relevancia puede estar entre -100 a +100. Si se coloca una relevancia de -100 el programa obvia las caras que se encuentran en curvatura y malla más fácil, ya que al obviar las caras finas el mallado se hace mucho más grande, aunque esto no es recomendable debido a que la calidad de la malla baja. Al colocar una relevancia de +100 o algún valor cercano significa que el programa va a respetar todas las curvaturas de la estructura, es decir toma con mayor referencia las zonas donde hay aristas determinantes, generándose mayor número de elementos, entre más perfecta sea la malla, mayor cantidad de elementos, entre más fina sea la malla, mejores resultados (Ansys - Help, 2016).

#### INSERCIÓN DE MALLAS LOCALES EN ZONAS DE INTERÉS.

La inserción de mallas locales se puede realizar con las siguientes configuraciones:

- **CURVATURA.** En el análisis CFD es muy utilizado ya que la mayoría de estudios se realizan en tuberías con zonas curvas, en este método el programa reconoce las curvaturas de la geometría y malla más fino (Ansys - Help, 2016).

- **ADAPTIVO.** Busca configuración de curvaturas, linealidad, caras planas y bordes, no reconoce las curvaturas, solo la mayoría de caras planas. Reconoce la unión entre caras planas y curvaturas y ahí malla más fino (Ansys - Help, 2016).
- **PROXIMIDAD Y CURVATURA.** La calidad se mejora, pero la desventaja es que el mado es muy lento.
- **PROXIMIDAD.** Busca elementos que se encuentre con cambio de sección o cambio de figura y realiza un mado más fino (Ansys - Help, 2016).

**2.3.4.4 Parámetros de calidad del mado.**

Primero se debe realizar un mado por defecto, con el cual se podrá saber si el volumen en análisis presenta o no algún tipo de inconveniente dentro de su configuración de modelado, si existiese alguna zona de interferencia, elementos cruzados o elementos sobrepuestos (Ansys - Help, 2016).

El diagnóstico de la malla ayuda a evaluar la calidad de la malla, éste incluye la cantidad de nodos en la malla, número de elementos en la malla, valores mínimos y máximos de celda, promedio y desviación estándar para estos tipos de métricas. Los números de nodos y elementos para todo el modelo se informan en el Panel de Diagnóstico de malla después de generar la malla. En el panel de Diagnóstico se revisa la métrica de interés en el menú desplegable Métrica de malla (Ansys - Help, 2016).

La calidad de la malla evalúa los elementos, escoge un elemento ideal de todo el volumen, el elemento ideal que tiene las cualidades perfectas y sobre ese elemento el programa evalúa a los demás elementos, dependiendo del tipo de evaluación se le asigna un valor.

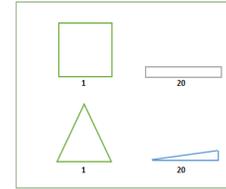
En el mado CFD, el programa ANSYS CFX utiliza el método de revisión de forma que se basa en la relación de aspecto, volumen de elemento y ángulo de caras. Se recomienda usar el criterio de oblicuidad (skewness), para calificar la calidad de la malla (Ansys - Help, 2016).

Los tipos de evaluación recomendados para CDF son:

• **RELACIÓN DE ASPECTO.**

Cuando el elemento tiene a tener un valor de 1, se recomienda que este valor no supere el valor de 3.

**FIGURA 2.38:** Aspecto radio para triángulos y cuadriláteros.



Fuente: (ANSYS-CFX).  
Elaborado por: Jenny Carrera G.

• **ORTOGONALIDAD.**

En la tabla se indican los valores entre 0 y 1, se recomienda que este valor este cercano a la unidad, ya que este parámetro indica que los ángulos en las celdas tienden a 90° (Monge, 2017).

**Tabla 2.3:** Calidad del mado. ORTOGONALIDAD.

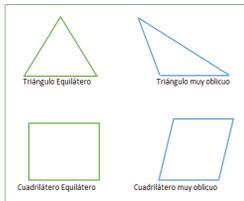
Valor de Ortogonalidad	Calidad de la celda
0 - 0.001	Inaceptable
0.001 - 0.14	Malo
0.15 - 0.20	Acceptable
0.20 - 0.69	Bueno
0.70 - 0.95	Muy Bueno
0.95 - 1	Excelente

Fuente: (ANSYS-CFX)

• **SKEWNESS.**

Este parámetro determina que tan cerca estamos de una cara ideal es decir determina la simetría y la oblicuidad de los elementos (Ansys - Help, 2016).

**FIGURA 2.39:** Calidad de mado. Skewness.



Fuente: (ANSYS - CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera G.

**Tabla 2.4:** Valores de Skewness.

Value of Skewness	Cell Quality
1	degenerate
0.9 - < 1	bad (silver)
0.75 - 0.9	poor
0.5 - 0.75	fair
0.25 - 0.5	good
> 0 - 0.25	excellent
0	equilateral

Fuente: (ANSYS - CFX)

En la **Tabla 2.3**, se indican los valores de oblicuidad y su interpretación de la calidad del elemento. Es así que el valor de 0 se lo da a un elemento equilátero, y el valor de 1 para un elemento fuera de las características requeridas es decir el peor elemento este elemento se caracteriza al tener sus nodos muy cercanos (Ansys - Help, 2016).

**2.3.4.5 Propiedades del fluido y condiciones de frontera del modelo numérico.**

ANSYS-CFX posee opciones de condiciones de frontera como: entradas, salidas, paredes, orificios. Las condiciones de frontera son establecidas en el dominio a simular, cada una según la zona que se tenga en la geometría. Se puede tener

varias combinaciones de estas condiciones siempre y cuando exista coherencia en el modelo geométrico. Dentro de la etapa de selección de los parámetros físicos y numéricos, se asignan los valores de las condiciones iniciales y de frontera a todas aquellas fronteras correspondientes (Lluquay, 2016).

**PROPIEDADES DEL FLUIDO.**

En Ansys-CFX –pre se especifica las propiedades del fluido a simular: el tipo de material, la densidad, temperatura, viscosidad del mismo, el software considera por defecto la densidad de los fluidos como constante (Ansys - Help, 2016).

**CONDICIONES DE BORDE.**

Las condiciones de contorno e iniciales son independientes de la metodología que se utilice para resolver las ecuaciones que gobiernan el problema. Estas condiciones indican el estado de las variables fluidas en el instante  $t = 0$ , en el primer paso del esquema de integración. Menor será el tiempo empleado para que el sistema converja mientras que la condición inicial sea más cercana a la solución final del problema. En toda simulación numérica, se considera una parte del dominio fluido para la resolución de las ecuaciones, las condiciones de contorno dan lugar a un contorno artificial donde se deben definir cada uno de los valores de las variables fluidas (Ansys - Help, 2016).

Un código CFD generalmente requiere de un archivo de entrada creado a partir de una lista de valores de parámetros de entrada que sean consistentes con la estrategia planteada o deseada. Además, generalmente se requiere de un archivo de malla que contenga la estructura de la malla, conjuntamente la información de las condiciones de frontera para generar una solución inicial del flujo y posteriormente solucionar el dominio completo (Lluquay, 2016).

• **BORDES DE ENTRADA.**

Este tipo de condición es utilizada para definir la región de entrada, y las propiedades de entrada del flujo al dominio. ANSYS CFX – pre (Setup) permite ingresar propiedades como: velocidad, presión, caudal másico. Para el tipo de condición de borde se selecciona *Inlet*.

**• BORDE DE PAREDES.**

El programa ANSYS CFX, Define esta condición como una condición de "no deslizamiento" (no slip Wall) o a su vez de "deslizamiento" (Wall free) (Ansys - Help, 2016).

**• BORDE DE SALIDA.**

Se define la región de salida, de igual manera se pueden ingresar propiedades como presión, caudal másico, si se ingresase presión, ésta sería la presión estática ya que es la facilitada por el software, para un análisis más preciso de la simulación del fluido. Para el tipo de condición de borde se selecciona *Outlet* (Ansys - Help, 2016).

**2.3.4.6 Número de courant (CFL).**

Este número fija como paso temporal máximo aquel que permite que la velocidad de propagación de las perturbaciones avance máximo una celda del mallado en cada *timestep*, para así llegar a la convergencia numérica.

$$CFL = \frac{u \cdot \Delta t}{\Delta x} \quad (2-52)$$

Donde:

*u* = Celeridad absoluta del fluido.

$\Delta t$  = Paso temporal, (*timestep*).

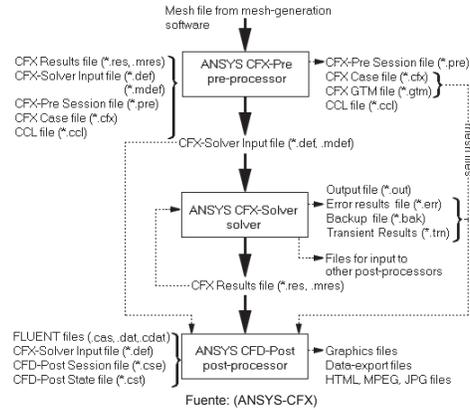
$\Delta x$  = Longitud del volumen finito, (tamaño de celda)

**2.3.4.7 Configuración del control del solver.**

En el proceso de creación del modelo, el ejecutador de CFX-Solver, y el análisis de los resultados, los módulos del software crean una serie de archivos diferentes.

En el siguiente diagrama de flujo se muestra el uso de los archivos estándar utilizados (Lluguay Duchí, 2016).

**FIGURA 2.40:** Diagrama de flujo. ANSYS CFX.

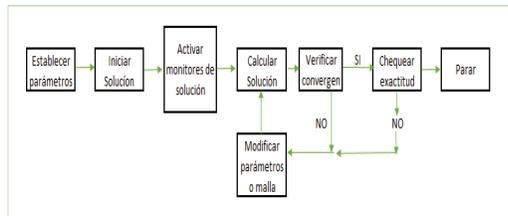


**2.3.4.8 Resolución numérica.**

**MONITOREO Y SIMULACIÓN.**

ANSYS cuenta con una herramienta de monitoreo de la solución, la cual muestra y reporta el comportamiento de los resultados en cada iteración, para identificar si se tiene una solución con tendencia a converger o a divergir. Esto se puede observar en gráficas donde se muestran los valores residuales de cada término de las ecuaciones a resolver. Para verificar la precisión alcanzada por cada uno de los parámetros monitoreados (Lluguay, 2016). Conjuntamente con lo mencionado anteriormente dentro del monitoreo se realiza un procedimiento de verificación de los resultados que arroja el software, para identificar anomalías que perjudiquen la convergencia de la solución (Lluguay, 2016). Se debe realizar un procedimiento adecuado para el monitoreo de la solución como se puede ver en el siguiente esquema (Ansys - Help, 2016).

**FIGURA 2.41:** Procedimiento para el monitoreo de la solución.



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera G.

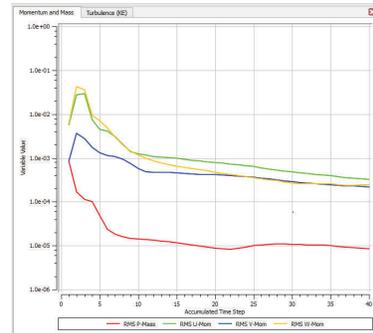
Mediante un proceso iterativo, el software ANSYS CFX realiza la resolución del sistema de ecuaciones para la discretización de las ecuaciones gobernantes, aplicando el método de multi malla. Las ecuaciones discretas son resueltas sobre un volumen de control. El método de multi malla acelera la convergencia de solución aplicando una o varias mallas virtuales más gruesas que la original (Lluguay, 2016).

**ANÁLISIS DE CONVERGENCIA.**

Para monitorear la convergencia se emplea gráficos que van cambiando con el transcurso del tiempo mediante un proceso iterativo. El paquete ANSYS se corre hasta lograr que los resultados se establezcan. El residuo es una medida de que tanto se desvía la solución numérica, a menor residuo mejor es la convergencia. De la literatura se concluye que la convergencia para un estado estable ocurre a partir de las 50 iteraciones en adelante (Lluguay, 2016).

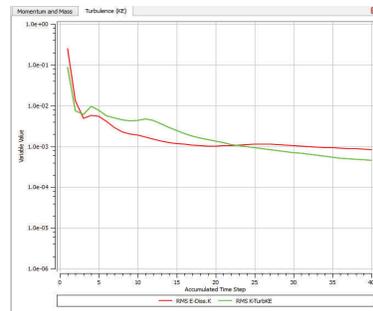
Los controles de convergencia de la solución se hacen mediante la ecuación de la continuidad, de la cantidad de movimiento, de la disipación turbulenta y de la energía cinética turbulenta. No se considera la ecuación de conservación de la energía debido a que no se estableció la existencia de transferencia de calor en el modelo (Lluguay, 2016).

**FIGURA 2.42:** Residuales de continuidad y velocidad.



Elaborado por: Jenny Carrera.

**FIGURA 2.43:** Residuales de energía cinética turbulenta y disipación turbulenta.



Elaborado por: Jenny Carrera.

2.4 ESTADO DEL ARTE

INVESTIGACIÓN	AÑO Y LUGAR	AUTOR	OBJETO DE ESTUDIO	RESUMEN
Simulación Numérica de una estructura separadora de caudales con metodología CFD aplicando el paquete computacional Ansys Cfx	Quito, septiembre 2015	Ortega Lara, Párrico Rubén	Implementar un modelo (Dinámica de fluidos computacional) a una estructura hidráulica denominada separador de caudales, a fin de evaluar el comportamiento de flujo y su interacción con las fronteras sólidas.	Se utilizó el código comercial ANSYS CFX para la simulación numérica y se validó los datos con los resultados obtenidos en el Laboratorio C.I.E.R.H.I. Se analizaron los escenarios propuestos, la influencia del tipo de mallado, modelo de turbulencia y características de cada simulación. Se logró optimizar el funcionamiento de la estructura con ayuda del modelo numérico y del modelo físico.
Modelo numérico de un canal de fuerte pendiente con rugosidad variable aplicando el software Ansys CFX y comparación con los resultados obtenidos en el paquete computacional OpenFOAM.	Quito, octubre 2017	Monge Jingo Carlos Franklin	Modelar numéricamente un canal de fuerte pendiente con rugosidad variable aplicando el software Ansys CFX y compararlo con los resultados obtenidos en el paquete computacional OpenFOAM, aplicando la metodología CFD (Dinámica de Fluidos Computacional).	Se realizó configuraciones como: creación de geometría, mallado, características del fluido, solución y procesamiento de resultados. Se obtuvieron las comparaciones de resultados entre el modelo físico, modelo Ansys CFX y modelo OpenFOAM, estableciendo porcentajes de variación en caudal, velocidad y energía mecánica.
Modelación numérica en tres dimensiones de flujo en las compuertas de la captación del proyecto Toachi - Pilatón aplicando dinámica de fluidos computacional (CFD)	Quito, julio 2017	Aulestia Alarcón, Carlos Andrés	Análisis de la base teórica de la dinámica de fluidos computacional (CFD), y determinar su aplicación en el diseño y optimización de obras hidráulicas, específicamente en la captación del proyecto hidroeléctrico Toachi Pilatón.	Con este proyecto se generó un plan de operación de las compuertas de limpieza del proyecto Hidroeléctrico Toachi Pilatón.

INVESTIGACIÓN	AÑO Y LUGAR	AUTOR	OBJETO DE ESTUDIO	RESUMEN
Estudio del comportamiento de fluidos de una micro central hidroeléctrica mediante la dinámica computacional de fluidos de alto rendimiento, para la generación de energía eléctrica.	Quito, noviembre 2016	Haro Valladares, Jonathan Alexis Sanaguano Jiménez Edison Fabricio	El presente estudio es el primer proyecto en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, sometido a análisis en el software computacional ANSYS, que permite predecir con seguridad como los productos se comportarán en el mundo real.	Se diseñó y estudió el prototipo de sistema gravitacional de vórtice en función del análisis mecánico realizado en el paquete ANSYS 17.1. El diseño consta de cuatro componentes: Estructura, reservorio, turbinas y Sistema gravitacional de vórtice. Se estudió el efecto de los diversos parámetros y el comportamiento del flujo de agua en forma individual, para la formación de un vórtice artificial en el prototipo.
Dimensionamiento del tanque de carga, tubería de presión, casa de máquinas y la descarga hidráulica central hidroeléctrica en la Estación Científica Amazonas Juni Juli Kawsay de la Universidad Central del Ecuador.	Quito, 2013	Jaya Quezada, Saúl Valle, Francisco, Joffre Rogoberto	Se obtiene datos necesarios, para realizar el diseño de las obras civiles, como: tanque de carga, la tubería de presión, la casa de máquinas y el canal de descarga, requeridos para la implantación de la Micro Central Hidroeléctrica.	En este proyecto se realizó el análisis técnico económico para tres alternativas diferentes del tanque de carga, por el método beneficio costo, se concluyó con los diseños de las obras mencionadas, así como recomendaciones necesarias para su construcción.
Evaluación de la formación y desarrollo del lapón severo en ríes de producción vía DFC.	Sartenejas, Julio 2008	Gil Lira, Manuel Alejandro	Estudiar el comportamiento de una mezcla blásica (Aire-Agua), en un ríer utilizando Herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional (DFC).	Se realizó el análisis en flujo blásico a través de un programa de análisis CFD, en este caso se utilizó ANSYS CFX V11.0 para las simulaciones monofásicas y multifásicas. Se evaluó la formación del flujo lapón en tuberías verticales a través del análisis fluido-dinámico, se trabajó con las opciones multifásicas de ANSYS CFX

INVESTIGACIÓN	AÑO Y LUGAR	AUTOR	OBJETO DE ESTUDIO	RESUMEN
Desarrollar un modelo CFD para el análisis del comportamiento del fluido en tuberías del banco de pérdidas de turbo maquinaria hidráulica y laboratorio.	Riobamba, 2016	Lugway Duchi, Kievet/Angel	En la simulación se analiza el flujo de fluidos en los tres tramos de tuberías, difiere el diámetro, en las aperturas tomadas en el control del flujo de fluidos en las tuberías con los datos adquiridos en el banco de pruebas.	En la solución de estas ecuaciones se utilizó ANSYS CFX basando en tres etapas para el cómputo numérico como son: Pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento. Las ecuaciones de Navier-Stokes son resueltas mediante la simulación numérica por el método de los volúmenes finitos. La discretización del dominio se realizó con un mallado no estructurado por el método tetraédrico. En la etapa del procesamiento se solucionan en análisis estacionario el flujo de fluidos. Se realizó un análisis de independencia de malla en cada configuración. Se dejó que en las zonas de recirculación el fluido se mueve lentamente y esto causa una transferencia de calor pobre en las áreas afectadas por dicha recirculación. Los resultados logrados con este software concuerdan bastante con otros obtenidos experimentalmente y numéricamente bajo régimen laminar.
Simulación y análisis de flujo de fluido transversal a través de bancos de tubos en línea usando el programa CFX	Venezuela, junio 2007	Díaz, Miguel Angel	Utilizar la solución numérica para resolver las ecuaciones de Navier - Stokes aplicadas a los bancos de tubos mediante el método de volúmenes finitos incluido en el software CFX 10.	

2.5 CONCLUSIONES.

- La mayoría de errores en la simulación de ambientes cerrados, como por ejemplo tuberías a presión, utilizando la modelación CFD recaen en el usuario, al ingreso de datos, condiciones de entrada y salida necesarias para la simulación, arrojando así resultados erróneos.
- El análisis de la capa límite tiene relevancia en la simulación numérica, debido a que su espesor determina la zona donde los efectos viscosos son considerables, y si no se toma en cuenta este espesor, los resultados de la simulación pueden resultar incorrectos.
- La modelación numérica es una herramienta complementaria para el diseño y comprobación del comportamiento hidráulico de estructuras hidráulicas, ya que en una simulación numérica se puede realizar variantes en su geometría o en las condiciones de contorno y obtener resultados de su funcionamiento en menos costo y tiempo que en un modelo físico.
- Debido a que el tratamiento de la turbulencia es un problema complejo, los modelos de turbulencia que se analizarán en el siguiente capítulo son el modelo de turbulencia RNG k – εpsilón, y el modelo de turbulencia Shear Stress Transport SST, con la finalidad de evaluar cual de estos arroja mejores resultados numéricos al compararlos con los valores del modelo físico.
- La calidad de la malla en flujos turbulentos juega un valor importante en la estabilidad y exactitud de los cálculos numéricos, debido a la interacción entre el flujo y la turbulencia los resultados numéricos tienden a ser más sensibles a la dependencia de las características del mallado.

## CAPÍTULO 3

### CASO DE APLICACIÓN DEL SOFTWARE ANSYS CFX A LA ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO – TOACHI.

#### 3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS SARAPULLO Y ALLURIQUÍN.

El proyecto Toachi – Pilatón está formado por dos aprovechamientos en cascada que de forma conjunta producen una energía total anual de 1100 GWH (Gigawatt hora), con una capacidad instalada total de 253 MW en las centrales, adicionalmente se dispone de una mini central al pie de la presa Toachi que turbinada de forma constante el caudal ecológico.

La cuenca del río Pilatón se desarrolla sobre una longitud aproximada de 40 Km y un ancho de 20 Km, con un área de drenaje hasta el sitio de la captación de 521 Km<sup>2</sup> y la cuenca del río Toachi se extiende sobre una longitud de 85 Km con un ancho medio de 20 Km, con un área de drenaje de 1476 Km<sup>2</sup> (Hidrotoapi E.P., 2011) A continuación se detallan brevemente los dos aprovechamientos que forman parte de el proyecto Toachi – Pilatón, así como también los elementos que los contienen.

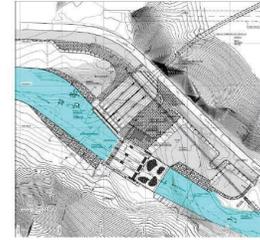
##### 3.1.1 APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO PILATÓN – SARAPULLO.

El aprovechamiento hidroeléctrico Pilatón – Sarapullo está formado por la captación del río Pilatón, obras de conducción, la casa de máquinas Sarapullo, las obras de descarga que se describen a continuación.

###### • CAPTACIÓN DEL RÍO PILATÓN.

La captación del río Pilatón se realiza a la altura del Km 60 de la vía Aloag – Santo Domingo, ubicada en las coordenadas WGS 84, N 9°96'1630; E 73°79'80, y la conforman las estructuras que se mencionan a continuación (Hidrotoapi E.P., 2011).

FIGURA 3.1: Planta de la captación del río Pilatón.



Fuente: (Hidrotoapi E.P., 2011)

Tabla 3.1: Estructuras Hidráulicas que conforman la Captación del Río Pilatón.

ESTRUCTURA HIDRÁULICA	DATOS GENERALES.
Azudes y vertederos	33.90m x 41.15m
Estructura de toma	8 aberturas de 4.00m x 1.60m
Rejilla de la Estructura de toma	39.00 m de longitud x 1.60m de altura
Canal despiador	2.50m x 41.00m y pendiente del 4%
Compuerta radial	2.50m x 2.00m
Desarenadores	4 desarenadores 9m x 40m y 4.50m de altura

Fuente: (Hidrotoapi E.P., 2011)  
Elaborado por: Jenny Carrera G.

###### • OBRAS DE CONDUCCIÓN.

Tabla 3.2: Obras de conducción – Captación Río Pilatón.

OBRAS DE CONDUCCIÓN	DATOS GENERALES.
Túnel a presión	Diámetro 3.80m, espesor 0.30m, 5.90 Km de longitud
Chimenea de Equilibrio Superior	Pozo vertical inferior de 3.50m de diámetro, y pozo principal de 12m de diámetro

Fuente: (Hidrotoapi E.P., 2011)  
Elaborado por: Jenny Carrera G.

###### • CASA DE MÁQUINAS DE SARAPULLO.

**Central Sarapullo.** Posee tres turbinas tipo Francis ubicadas en la casa de máquinas subterránea, cada turbina tiene una potencia nominal por unidad de 16.3

MW, para una caída neta de 138.30 m y caudal de diseño de 13.33 m<sup>3</sup>/s, consiguiendo así una potencia total instalada de la central de 49 MW (Hidrotoapi E.P., 2011)

###### • OBRAS DE DESCARGA.

Tabla 3.3: Obras de descarga – Captación Río Pilatón.

OBRAS DE DESCARGA	DATOS GENERALES.
Chimenea de Equilibrio Inferior	Largo = 40 m, base = 10 m, altura = 24 m.
Túnel de Descarga	Diámetro Interno 3.80m, 470m de longitud

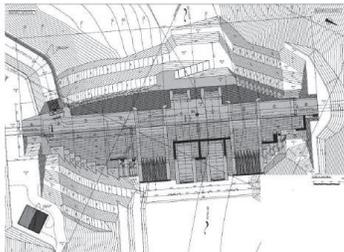
Fuente: (Hidrotoapi E.P., 2011)  
Elaborado por: Jenny Carrera G.

##### 3.1.2 APROVECHAMIENTO TOACHI – ALLURIQUÍN.

###### LA PRESA TOACHI Y SUS OBRAS ANEXAS.

Está ubicada aguas abajo de la confluencia de los ríos Pilatón y Toachi, en las coordenadas WGS84, N 9°59'340; E 73°19'80. La presa Toachi es una estructura a gravedad construida de hormigón, con una altura máxima de 60 m, longitud de 170.50 m y un ancho de 10 m. Los parámetros aguas arriba y aguas abajo son inclinados V: H = 1:0.3 y 1:0.7, respectivamente (Hidrotoapi E.P., 2011).

FIGURA 3.2: Implementación de la presa Toachi.



Fuente: (Hidrotoapi E.P., 2011)

Tabla 3.4: Estructuras Hidráulicas que conforman la Presa Toachi.

ESTRUCTURA HIDRÁULICA	DATOS GENERALES.
Canal de alimentación de la Toma	Sección trapezoidal de 8m de base, 100m de longitud y 4.5% de pendiente.
Obra de Toma	Sección inicial 5.75m x 7.85m, sección final 3.50m x 5.60m
Vertedero de excesos.	Están controlados por compuertas tipo clapeta de 14m de base y 7.50m de altura.
Desagües de Fondo	Dos desagües controlados por compuertas radiales de 8m de base y 8m de altura.
Estanque disipador de energía	Ancho = 70 m y longitud = 65 m
Galería de Interconexión	B x H = 3.50 m x 5.60 m.

Fuente: (Hidrotoapi E.P., 2011)  
Elaborado por: Jenny Carrera G.

###### OBRAS DE CONDUCCIÓN.

Tabla 3.5: Obras de conducción – Presa Toachi.

OBRAS DE CONDUCCIÓN	DATOS GENERALES.
Túnel de Carga Toachi - Alluriquín	Diámetro 5.60m, espesor 0.30m, revestido de hormigón, 8.65 Km de longitud.
Chimenea de Equilibrio Superior Alluriquín	Pozo vertical inferior de 3.50m de diámetro, y pozo principal de 15.00m de diámetro
Tubería a Presión	Ramal principal 4.70m de Diámetro y 180m de longitud.

Fuente: (Hidrotoapi E.P., 2011)  
Elaborado por: Jenny Carrera G.

###### • OBRAS DE DESCARGA.

Tabla 3.6: Obras de descarga – Presa Toachi.

OBRAS DE DESCARGA	DATOS GENERALES.
Chimenea de Equilibrio Inferior Alluriquín	B x H = 10m x 36m y una longitud de 41m.
Descarga Alluriquín	Diámetro Interno 5.60m, 470m de longitud

Fuente: (Hidrotoapi E.P., 2011)  
Elaborado por: Jenny Carrera G.

• **CASA DE MÁQUINAS DE ALLURIQUÍN.**

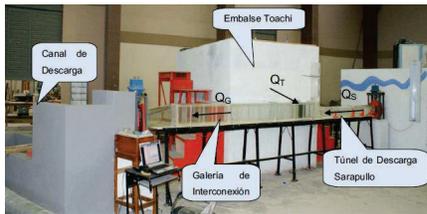
La casa de máquinas de la Central Alluriquín consta de tres turbinas tipo Francis de eje vertical, con una potencia nominal por unidad de 68 MW, y una potencia instalada de 204 MW, para una caída neta de 231m y caudal de diseño de 33.33 m³/s (Hidrotoapi E.P., 2011).

**3.2 DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO ESCALA 1:20 DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO – TOACHI.**

**3.2.1 GENERALIDADES DEL MODELO FÍSICO.**

El presente proyecto de titulación se trata de realizar la simulación numérica de una estructura de interconexión de geometrías diferentes, usando el paquete computacional comercial Ansys CFX académico, el mismo que será calibrado con el modelo físico, "Estudio en Modelo Hidráulico, Escala 1:20, de la estructura de unión Sarapullo – Toachi facilitados en el CIERHI – EPN, 2011. Además se ha recopilado toda la información disponible referente, por ejemplo el proyecto de titulación, "Análisis en Modelo Hidráulico de la estructura de interconexión de las Centrales Sarapullo y Alluriquín." (Maldonado & Pallares, 2015).

**FIGURA 3.3:** Modelo físico, Estructura de unión Sarapullo- Toachi.



Fuente: (CIERHI - EPN, 2011)

Como se puede observar en la **FIGURA 3.3** la estructura hidráulica está compuesta por varias secciones entre ellas tenemos: el embalse Toachi, el túnel de Descarga Sarapullo, la Galería de Interconexión, el canal de descarga. Sin embargo, este

piezómetro, hasta el piezómetro 7 (P7), ubicado en la zona de descarga donde circulan los dos caudales en conjunto.

**3.2.1.1 Criterios usados para el desarrollo del modelo físico utilizado.**

En la unión de dos flujos de diferente presión, que son conducidos por geometrías diferentes, la simulación del flujo de agua en un modelo físico a una escala reducida demanda que se cumplan con los tres objetivos de similitud: geométrica, dinámica y cinemática. Sin embargo, al realizar los modelos a escala de estructuras con geometrías complejas es muy difícil cumplir con la similitud dinámica de todas las fuerzas que actúan en el fenómeno físico, por lo que se restringe el estudio a las fuerzas predominantes (Daily, 2005).

Para el estudio del modelo físico de la estructura de unión de las centrales Sarapullo y Alluriquín, se debe cumplir algunas condiciones que favorecen a la compatibilidad del modelo con la estructura prototipo.

- Criterios de similitud que atestigüen la semejanza entre prototipo y modelo.
- Profundidades mínimas de agua dentro de la estructura y todos sus elementos, para de esta manera posibilitar el análisis del funcionamiento de la misma en los distintos escenarios de operación.
- Relación de magnitudes, para las dimensiones de los elementos que componen la estructura de interconexión y las condiciones de ensayo tienen que cumplir con el criterio de similitud.

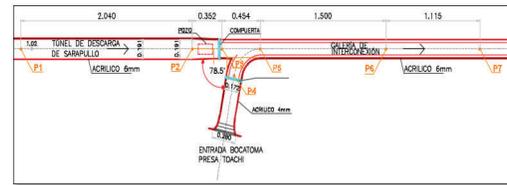
**SIMILITUD DINÁMICA RESTRINGIDA**

El flujo que se estudia en el modelo físico de una estructura a presión presenta velocidades relativamente bajas, en este flujo predominan las fuerzas de presión e inercia. Es decir, la incidencia de las fuerzas viscosas (resistencia al movimiento y separación de flujo) debe mantenerse relativamente pequeña; así como el efecto de las fuerzas de elasticidad / compresibilidad del agua (tránsito de ondas presión), de la tensión superficial y de la presión de vapor (cavitación) se debe mantener despreciable.

El criterio de similitud escogido para este modelo físico es el criterio según Euler. Se necesita que el valor del número de Euler del modelo sea igual al que tiene el

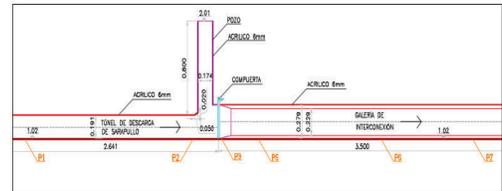
trabajo se concentra hasta un tramo de la parte final de la Galería de Interconexión, debido a que el objetivo principal es el cálculo de coeficientes de pérdida en la unión de los flujos, y por tanto se puede utilizar el piezómetro 7 para realizar la calibración del modelo numérico sin necesidad de crear la geometría hasta la descarga, como se puede observar en la **FIGURA 3.4** (Maldonado & Pallares, 2015).

**FIGURA 3.4:** Modelo físico utilizado en la simulación numérica. (Vista en planta).



Fuente: (Hidrotoapi E.P., 2011).

**FIGURA 3.5:** Modelo físico utilizado en la simulación numérica. (Vista Lateral)



Fuente: (Hidrotoapi E.P., 2011).

En la **FIGURA 3.4** y la **FIGURA 3.5** se puede observar la geometría del modelo físico tanto en planta como lateralmente, se observa la ubicación de los siete piezómetros, la creación de la estructura, empezará desde la ubicación del piezómetro 1 (P1) en la tubería que transporta el caudal turbinado del río Sarapullo, desde el piezómetro 4 (P4), ubicado en el canal que conduce el caudal del río Toachi, sin tomar en cuenta la compuerta que se ubica a la izquierda de ese

prototipo en la naturaleza, para garantizar la incidencia relativa de estas fuerzas esté debidamente representada en el modelo.

El número de Euler es la relación entre las fuerzas inerciales con las fuerzas de presión (Castro, 2009)

$$Eu = \frac{p}{\rho \cdot V^2} \tag{3.1}$$

Donde:

- $p$  = Presión del fluido
- $\rho$  = Densidad del fluido
- $V$  = Velocidad media.

Esta ecuación puede ser expresada de la siguiente forma:

$$Eu = \frac{V}{\sqrt{\frac{2p}{\rho}}} \tag{3.2}$$

**3.2.1.2 Componentes del modelo físico.**

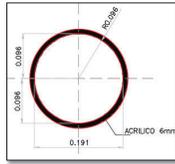
**MODELO DE LA ESTRUCTURA DE INTERCONEXIÓN SARAPULLO – TOACHI**

Esta estructura está construida a una escala 1:20 y se compone de tres elementos: El Túnel de Descarga Sarapullo, la Estructura de Unión y la Galería de Interconexión. Se han representado 44 m del túnel de descarga Sarapullo a la zona de aproximación a la estructura de unión y 60 m de la Galería de interconexión (CIERHI - EPN, 2011).

• **Túnel de Descarga Sarapullo.**

Se construyó un tubo circular de 0.19 m de diámetro y una longitud de 2.1 m, moldeado en acrílico, con un espesor de 6 mm. Aguas debajo de éste se dispone de una estructura de transición que ayuda a empatar el tubo circular con la sección de la estructura de unión. Se construye un pozo de descarga en la parte superior de esta pieza, el cual funciona cuando la Central Alluriquín esté fuera de actividad (CIERHI - EPN, 2011).

FIGURA 3.6: Túnel de descarga Sarapullo. Modelo físico.



Fuente: (Informe Fase I, 2011), (CIERHI - EPN, 2011)

FIGURA 3.7: Estructura de Transición Túnel de Descarga Sarapullo – Estructura de Unión.

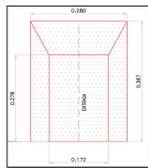


Fuente: (Informe Fase I, 2011), (CIERHI - EPN, 2011)

• **Bocatoma de la presa Toachi.**

Esta estructura está moldeada en acrílico de 4 mm de espesor. La bocatoma de la presa Toachi tiene una variación de sección tanto en planta como en corte, su sección inicial es 29 x 37 cm y una sección final de 17 x 28 cm.

FIGURA 3.8: Sección Transversal de la Bocatoma del Embalse Toachi.



Fuente: (Informe Fase I, 2011), (CIERHI - EPN, 2011)

En la **Tabla 3.8** se indican las dimensiones geométricas del modelo a escala 1:20, además las variables hidrodinámicas relevantes.

Tabla 3.8: Dimensiones geométricas del modelo físico.

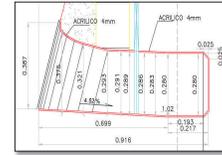
DIMENSIÓN		PROTOTIPO	MODELO
CAUDALES MÁXIMOS	Túnel Sarapullo	40.0 m <sup>3</sup> /s	22.4 l/s
	Toma Embalse Toachi	64.1 m <sup>3</sup> /s	36.0 l/s
	Galería de Interconexión	104.1 m <sup>3</sup> /s	58.2 l/s
TUNEL SARAPULLO	Diámetro	3.80 m	0.19m
	Longitud	40.00m	2.00m
TOMA EMBALSE TOACHI	Sección	5.75 x 7.50 m	0.29 x 0.38 m
GALERÍA DE INTERCONEXIÓN	Sección	3.50 x 5.60 m	0.18 x 0.28m
	Longitud	50.00m	2.50m

Fuente: (CIERHI - EPN, 2011)  
Elaborado por: Jenny Carrera G.

Tabla 3.9: Plan de pruebas propuesto. Fase 1.

ESCENARIO	TRAMO	Qp (m <sup>3</sup> /s)	Qm (l/s)	OBSERVACIONES
1	Sarapullo (Q <sub>c</sub> )	40	22.4	Trabajando tres turbinas en Sarapullo, funcionando tres turbinas con el caudal de diseño en Alluriquin. Fase(1,2)
	Toachi (Q <sub>T</sub> )	64.1	35.9	
	Galería (Q <sub>c</sub> )	104.1	58.2	
2	Sarapullo (Q <sub>c</sub> )	6.0	3.4	Trabajando al 45% una turbina en Sarapullo, funcionando una turbina al 45% en Alluriquin.
	Toachi (Q <sub>T</sub> )	13.1	7.3	
	Galería (Q <sub>c</sub> )	19.1	10.7	
3	Sarapullo (Q <sub>c</sub> )	13.3	7.5	Trabajando una turbina en Sarapullo, funcionando una turbina en Alluriquin. Fase(1,2)
	Toachi (Q <sub>T</sub> )	24.1	13.5	
	Galería (Q <sub>c</sub> )	35.7	20.9	
4	Sarapullo (Q <sub>c</sub> )	26.7	14.9	Trabajando dos turbinas en Sarapullo, funcionando dos turbinas en Alluriquin. Fase(1,2)
	Toachi (Q <sub>T</sub> )	44.1	24.7	
	Galería (Q <sub>c</sub> )	70.8	39.6	
5	Sarapullo (Q <sub>c</sub> )	6.0	3.4	Trabajando al 45% de una turbina en Sarapullo, funcionando una turbina en Alluriquin.
	Toachi (Q <sub>T</sub> )	31.5	17.6	
	Galería (Q <sub>c</sub> )	37.5	20.9	
6	Sarapullo (Q <sub>c</sub> )	13.3	7.5	Trabajando una turbina en Sarapullo, funcionando dos turbinas en Alluriquin. Fase(1,2)
	Toachi (Q <sub>T</sub> )	57.5	32.1	
	Galería (Q <sub>c</sub> )	70.8	39.6	
7	Sarapullo (Q <sub>c</sub> )	26.7	14.9	Trabajando dos turbinas en Sarapullo funcionando dos turbinas con el caudal de diseño y una tercera al 60%. Fase(1,2)
	Toachi (Q <sub>T</sub> )	64.1	35.9	
	Galería (Q <sub>c</sub> )	90.8	50.8	

FIGURA 3.9: Corte Longitudinal de la bocatoma del Embalse Toachi.



Fuente: (Informe Fase I, 2011), (CIERHI - EPN, 2011).

• **Galería de interconexión.**

Presenta una sección de 0.29 x 0.39 m con chaflanes en sus esquinas a 45° de 0.04 m de largo, con una longitud aproximada de 2.5 m. Al final de ésta estructura se tiene una transición no excéntrica, de 0.60 m de longitud, que conecta la sección rectangular de la galería con una sección circular de 0.20 m.

En el informe "Estudio en Modelo Hidráulico, Escala 1:20 de la estructura de unión Sarapullo – Toachi, (CIERHI - EPN, 2011), se realizaron pruebas con diferentes escalas se escoge la escala 1:20 por presentar la mejor opción con respecto a valores de caudales y número de Reynolds ya que con las otras escalas analizadas el valor del número de Reynolds es inferior a 2x10<sup>4</sup> y valores de caudal muy pequeños. En la **Tabla 3.7** se muestran las principales características del modelo y las magnitudes derivadas para la modelación física del fenómeno de flujo.

Tabla 3.7: Características del modelo físico y las magnitudes derivadas.

MAGNITUD	MODELO A ESCALA 1:20				
	Símbolo	Equivalencia según Euler	Valor Numérico	Valor prototipo	Valor modelo
Longitud	e <sub>L</sub>	e <sub>L</sub>	20	1m	5cm
Caudal	e <sub>Q</sub>	(e <sub>L</sub> ) <sup>5/2</sup>	1788,85	100 m <sup>3</sup> /s	55,9 l/s
Velocidad	e <sub>V</sub>	(e <sub>L</sub> ) <sup>1/2</sup>	4,47	2 m/s	0,45 m/s
Altura de Presión	e <sub>P</sub>	e <sub>L</sub>	20	10 m	50 cm
Tiempo	e <sub>T</sub>	(e <sub>L</sub> ) <sup>1/2</sup>	4,47	1 h	13,4 min
Fuerza	e <sub>F</sub>	(e <sub>L</sub> ) <sup>3</sup>	8000	1 T	0,13 Kg
Altura de energía	e <sub>E</sub>	e <sub>L</sub>	20	10m	50 cm

Fuente: (CIERHI - EPN, 2011).  
Elaborado por: Jenny Carrera G.

8	Sarapullo (Q <sub>c</sub> )	6	3.4	Trabajando al 45% una turbina en Sarapullo, funcionando tres turbinas en Alluriquin. Fase(1,2)
	Toachi (Q <sub>T</sub> )	98.14	54.9	
	Galería (Q <sub>c</sub> )	104.1	58.2	
9	Sarapullo (Q <sub>c</sub> )	0.0	0.0	Funcionamiento de tres turbinas con el caudal de diseño, en Alluriquin (captado únicamente del embalse Toachi.)
	Toachi (Q <sub>T</sub> )	104.1	58.2	
	Galería (Q <sub>c</sub> )	104.1	58.2	

Fuente: (CIERHI - EPN, 2011)  
Elaborado por: Jenny Carrera G.

Tabla 3.10: Plan de pruebas propuesto. Fase 2.

ESCENARIO	TRAMO	Qp	Qm	OBSERVACIONES
		(m <sup>3</sup> /s)	(l/s)	
1	Sarapullo (Q <sub>c</sub> )	40.3	22.51	Trabajando tres turbinas en Sarapullo, funcionando tres turbinas con el caudal de diseño en Alluriquin
	Toachi (Q <sub>T</sub> )	64.0	35.80	
	Galería (Q <sub>c</sub> )	104.3	58.29	
3	Sarapullo (Q <sub>c</sub> )	13.3	7.44	Trabajando una turbina en Sarapullo, funcionando una turbina en Alluriquin.
	Toachi (Q <sub>T</sub> )	24.2	13.55	
	Galería (Q <sub>c</sub> )	37.6	20.99	
4	Sarapullo (Q <sub>c</sub> )	26.7	14.91	Trabajando dos turbinas en Sarapullo, funcionando dos turbinas en Alluriquin.
	Toachi (Q <sub>T</sub> )	44.0	24.60	
	Galería (Q <sub>c</sub> )	70.7	39.51	
6	Sarapullo (Q <sub>c</sub> )	13.3	7.44	Trabajando una turbina en Sarapullo, funcionando dos turbinas en Alluriquin.
	Toachi (Q <sub>T</sub> )	57.5	32.10	
	Galería (Q <sub>c</sub> )	70.8	39.56	
7	Sarapullo (Q <sub>c</sub> )	26.7	14.91	Trabajando dos turbinas en Sarapullo funcionando dos turbinas con el caudal de diseño y una tercera al 60%
	Toachi (Q <sub>T</sub> )	64.0	35.78	
	Galería (Q <sub>c</sub> )	90.7	50.69	
8	Sarapullo (Q <sub>c</sub> )	5.9	3.32	Trabajando al 45% una turbina en Sarapullo, funcionando tres turbinas en Alluriquin.
	Toachi (Q <sub>T</sub> )	98.3	54.9	
	Galería (Q <sub>c</sub> )	104.2	58.2	

Fuente: (CIERHI - EPN, 2011)  
Elaborado por: Jenny Carrera G.

3.2.1.3 Plan de pruebas ejecutado.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en el modelo físico, se mostrarán los valores necesarios para la comparación con el modelo numérico.

En el modelo numérico se tratarán todos los escenarios de la Fase 2 y tres de los escenarios de la Fase 1, por lo que los resultados mostrados son correspondientes a los escenarios mencionados.

**Tabla 3.11:** Registro de resultados Fase 1 y Fase 2. Cuadro de Caudales obtenidos en el modelo físico, para los diferentes escenarios.

FASE 1			
UBICACIÓN	ESCENARIO	Modelo Físico Q (L/s)	Observaciones
SARAPULLO	ESCENARIO 2	3,32	Trabajando al 45% una turbina en Sarapullo, funcionando una turbina al 45% en Alluriquín.
TOACHI		7,31	
GALERIA		10,63	
SARAPULLO	ESCENARIO 5	3,32	Trabajando al 45% de una turbina en Sarapullo, funcionando una turbina en Alluriquín.
TOACHI		17,55	
GALERIA		20,87	
SARAPULLO	ESCENARIO 9	0	Funcionamiento de tres turbinas con el caudal de diseño, en Alluriquín (captado únicamente del embalse Toachi.)
TOACHI		58,53	
GALERIA		58,53	

Fuente: (CIERHI - EPN, 2011)  
Elaborado por: Jenny Carrera G.

FASE 2			
UBICACIÓN	ESCENARIO	Modelo Físico Q (L/s)	Observaciones
SARAPULLO	ESCENARIO 1	22,51	Trabajando tres turbinas en Sarapullo, funcionando tres turbinas con el caudal de diseño en Alluriquín
TOACHI		35,8	
GALERIA		58,29	
SARAPULLO	ESCENARIO 3	7,44	Trabajando una turbina en Sarapullo, funcionando una turbina en Alluriquín.
TOACHI		13,55	
GALERIA		20,99	
SARAPULLO	ESCENARIO 4	14,91	Trabajando dos turbinas en Sarapullo, funcionando dos turbinas en Alluriquín.
TOACHI		24,6	
GALERIA		39,51	
SARAPULLO	ESCENARIO 6	7,44	Trabajando una turbina en Sarapullo, funcionando dos turbinas en Alluriquín.
TOACHI		32,1	
GALERIA		39,56	
SARAPULLO	ESCENARIO 7	14,91	Trabajando dos turbinas en Sarapullo funcionando dos turbinas con el caudal de diseño y una tercera al 60%
TOACHI		35,78	
GALERIA		50,69	
SARAPULLO		3,32	

**3.3 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO.**

**3.3.1 INGRESO DE LA GEOMETRÍA.**

Como el problema en estudio se trata de un flujo confinado en un ciclo cerrado, el primer paso consiste en representar la geometría tridimensional que ocupa el agua dentro de la tubería. Se ha creado un modelo CAD del dominio computacional que representa el modelo físico que se requiere simular. Se realiza una geometría tridimensional por la cual circulará el agua a presión. Las medidas para la elaboración de la geometría se mencionaron anteriormente en la **Tabla 3.8**.

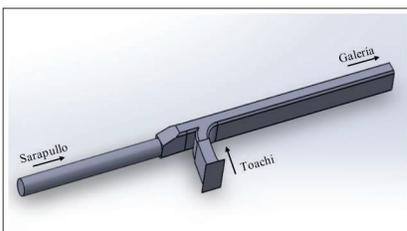
• **Descripción de la geometría.**

La estructura de interconexión donde se va a analizar el comportamiento del fluido, está formada por diferentes geometrías: el túnel de Sarapullo tiene una sección transversal circular, la entrada de la bocatoma Toachi es rectangular, mientras que la sección de la salida de la galería es un rectángulo con aristas de 45° en los vértices.

• **Modelado tridimensional de la geometría.**

Se puede emplear cualquier programa CAD para la construcción de la geometría 3D del modelo y posteriormente exportar el archivo con un formato compatible al ANSYS CFX, se empleó el programa SOLIDWORKS para elaborar la geometría tridimensional y representar el modelo a simular.

**FIGURA 3.11:** Estructura de interconexión 3D en SOLIDWORKS.

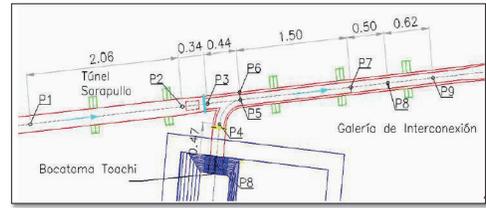


Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

TOACHI	ESCENARIO 8	54,94	Trabajando al 45% una turbina en Sarapullo, funcionando tres turbinas en Alluriquín.
GALERIA		58,26	

Fuente: (CIERHI - EPN, 2011)  
Elaborado por: Jenny Carrera G.

**FIGURA 3.10:** Ubicación de los puntos piezométricos.



Fuente: (CIERHI - EPN, 2011)

En la **Tabla 3.12** se indican los valores de carga piezométrica de los nueve escenarios del modelo físico (CIERHI - EPN, 2011), en los diferentes puntos piezométricos denotados por la simbología P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, como se observa en la **FIGURA 3.10**

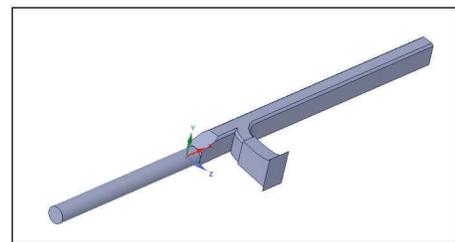
**Tabla 3.12:** Registro de resultados Fase 1 y Fase 2. Cuadro de Caudales en los diferentes piezómetros.

ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO - ALLURIQUÍN.										
Nivel (m)										
Escenarios										
PIEZÓMETRO	Pto	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P1	0,887	0,832	0,896	0,930	0,927	0,937	0,885	0,907	0,000	
P2	0,884	0,832	0,893	0,926	0,927	0,935	0,881	0,906	0,000	
P3	0,888	0,832	0,894	0,928	0,927	0,936	0,883	0,906	1,062	
P4	0,885	0,832	0,893	0,927	0,925	0,930	0,877	0,884	1,042	
P5	0,836	0,831	0,889	0,907	0,921	0,913	0,844	0,862	1,025	
P6	0,842	0,831	0,890	0,910	0,919	0,917	0,850	0,875	1,041	
P7	0,824	0,831	0,888	0,903	0,918	0,907	0,835	0,851	1,015	
P8	0,821	---	0,888	0,902	---	0,906	0,834	0,849	---	

Fuente: (CIERHI - EPN, 2011)  
Elaborado por: Jenny Carrera G.

Una vez importada la estructura se corrigen algunas irregularidades en el modelador de ANSYS, SpaceClaim para arreglar defectos que estén presentes en la geometría elaborada.

**FIGURA 3.12:** Estructura de interconexión 3D en SpaceClaim.



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

**3.3.2 MALLADO DEL DOMINIO COMPUTACIONAL.**

Con el generador de malla que tiene el paquete computacional ANSYS- CFX, se analizará dos tipos de mallas para la modelación numérica de la unión de flujos.

- 1. **MALLADO HEXAEDRICO.**
- 2. **MALLADO TETRAÉDRICO.**

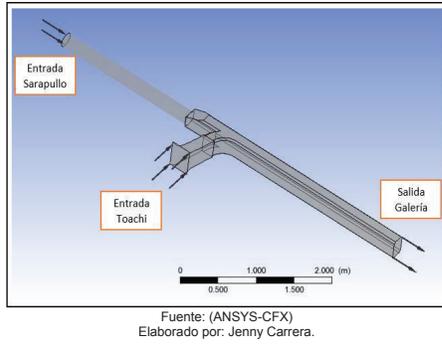
Estos tipos de mallado se detallarán en el numeral 3.4.2.

**3.3.3 CONDICIONES DE BORDE DEL MODELO NUMÉRICO.**

- **DEFINICIÓN DE PROPIEDADES Y CONDICIONES DE FRONTERA.**

Al realizar un análisis al modelo geométrico de la estructura de interconexión donde se interpreta que el modelo tiene 4 componentes, dos entradas de flujo, una salida de agua y la última perteneciente a todas las paredes de la estructura. Se verificarán los datos experimentales con los datos obtenidos de la simulación en el modelo numérico.

FIGURA 3.13: Asignación de nombres a las caras de la geometría.



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

• **Intensidad de turbulencia.**

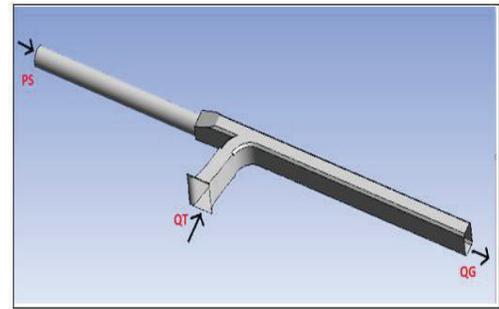
Dentro de los parámetros de la condición de frontera a la entrada para la simulación del fluido en estado estable nos permite seleccionar la opción de intensidad de turbulencia. El software tiene tres alternativas de intensidad de turbulencia considerando 1% baja, 5% media y 10% alta. (Lluگوی, 2016)  
Es necesario especificar la intensidad de la turbulencia para la solución del análisis en estado estable. ANSYS – CFX.

• **Datos de ingreso para la calibración.**

Para la calibración del modelo numérico con los datos del modelo físico se ha tomado el Escenario 1, de la Fase II del Informe "Estudio en Modelo Hidráulico, Escala 1:20 De la estructura de Unión Sarapullo – Toachi" (CIERHI - EPN, 2011), después de simulaciones previas con dicho escenario y con una serie de combinaciones de datos de entrada, se ha optado por ingresar dato de presión en la entrada de Sarapullo, y datos de caudal en la salida de la Galería de Interconexión y en la entrada de la Bocatoma Toachi como se indica en la FIGURA 3.14 , ya que de esta manera los resultados se acercan más a los obtenidos en el

modelo físico. En el programa se ingresa el caudal como una tasa de flujo másico, (Mass Flow Rate). La rugosidad que se ingresa en las paredes del programa es de 0.0015 mm al tratarse de acrílico.

FIGURA 3.14: Datos de ingreso para la calibración del modelo.



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Tabla 3.13: Datos de ingreso para la calibración del modelo.

UBICACIÓN	ESCENARIO	DATO DE INGRESO	Unidad
SARAPULLO	ESCENARIO 1	8690.83	Pa
TOACHI		35.77	kg/s
GALERIA		58.24	kg/s

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Tabla 3.14: Condiciones de contorno en la entrada Toachi.

Entrada Toachi (Inlet)	
Tipos de condición de borde	Inlet
Definición de la condición	Mass Flow Rate
Dirección de flujo	Condiciones Normales
Turbulencia	Intensidad media 5%

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Tabla 3.15: Condiciones de contorno en la entrada Sarapullo.

Entrada Sarapullo (Inlet)	
Tipos de condición de borde	Inlet
Definición de la condición	Presión
Presión	Presión estática
Turbulencia	Zero gradiente.

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Tabla 3.16: Condiciones de contorno en la salida Galería.

Salida Galería (Outlet)	
Tipos de condición de borde	Outlet
Definición de la condición	Mass Flow Rate

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Tabla 3.17: Condiciones de contorno en las fronteras sólidas.

Pared (Wall)	
Tipos de condición de borde	Wall
Definición de la condición	Rugosidad
Rugosidad de las paredes	0.0015 mm

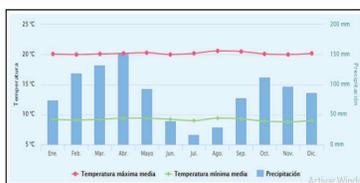
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

3.3.4 PARÁMETROS FÍSICOS.

• **Propiedades del fluido.**

Para determinar la temperatura del estudio se realizó un análisis de la temperatura durante los 12 meses del año, y se concluye que la temperatura es de 15°C.

FIGURA 3.15: Gráfica de temperatura.



Fuente: (Wordlmeteo, 2018)

Tabla 3.18: Temperatura máxima, mínima y promedio.

Temperatura. °C	
Temperatura máxima	20°C
Temperatura mínima	9°C
Temperatura promedio	15°C

Fuente: (Wordlmeteo, 2018)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Las propiedades físicas del fluido para la simulación se detallan a continuación.

Tabla 3.19: Propiedades del fluido. (Agua)

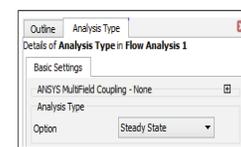
CARACTERÍSTICAS	VALOR	UNIDAD
Densidad	999.1	kg/m <sup>3</sup>
Temperatura	15	°C
Conductividad Térmica	0.6069	W/m <sup>2</sup> K

Elaborado por: Jenny Carrera.

• **TIPO DE ANÁLISIS.**

Para la solución de este modelo matemático en el interior de la conducción se realiza en estado estacionario. Según el alcance o el objetivo que tiene este proyecto que es buscar los coeficientes de pérdida, por lo que se necesita, hacer una simulación con caudal constante, es decir hacer una simulación considerando flujo estacionario, ya que no se requiere analizar otros fenómenos, que tengan relación con flujo transitorio. Además, considerando que en el modelo físico, siempre hubo un caudal que pasó constante.

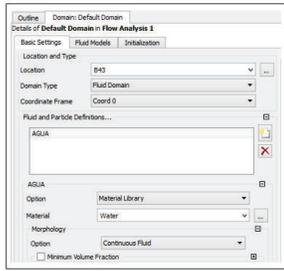
FIGURA 3.16: Tipo de análisis a simular.



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

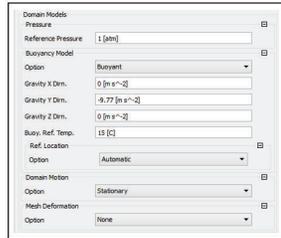
A continuación se indica el ingreso de los datos de condiciones de contorno antes mencionados en el paquete ANSYS CFX para la solución estacionaria (steady), en este caso la densidad se considera constante es decir un fluido incompresible.

FIGURA 3.17: Propiedades del fluido.



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

FIGURA 3.18: Parámetros físicos.

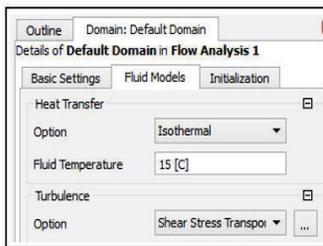


Fuente: (ANSYS-CFX)

3.3.5 SELECCIÓN DEL MODELO DE TURBULENCIA.

Existen algunos modelos de turbulencia que puede predecir de forma fiable todo tipo de flujos turbulentos, cada uno de los modelos tiene sus fortalezas y debilidades. En este estudio realiza el análisis comparativo entre se los modelos de turbulencia k-epsilon RNG y Shear Stress Transport (SST). Según el análisis de influencia del modelo de turbulencia, se escogió el modelo que representa de mejor manera la turbulencia del presente fenómeno físico, unión de dos flujos.

FIGURA 3.20: Modelo de Turbulencia Shear Stress Transport, (MT2).



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

• Análisis de convergencia.

Se resuelve las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento lineal en x, y, y z, se corre el programa hasta lograr la convergencia es decir que los residuos se estabilicen, es importante mencionar que un residuo es una medida de que tanto se desvía la solución numérica de la ecuación dada del valor exacto de la solución. Para establecer en que iteración se produce la convergencia se realizó una simulación con 10000 iteraciones como se puede observar en la FIGURA 3.21, y FIGURA 3.22, de las cuales se puede concluir que la convergencia ocurre a partir de las 1000 iteraciones, por lo cual para las siguientes simulaciones se realizarán con 1000 iteraciones.

Para el caso denominado MT1, que se trata de la geometría con un mallaado hexaédrico y con un modelo de turbulencia K-epsilon RNG, se realizaron 1000 iteraciones y se puede observar que esta convergencia no está completamente desarrollada, y los residuos no se estabilizan en 1.0E-06 con respecto a los valores iniciales, como se puede visualizar en la FIGURA 3.23.

3.4 CALIBRACIÓN DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA CON LOS DATOS EXPERIMENTALES DEL MODELO FÍSICO.

Para la calibración del modelo numérico se tomó en cuenta la influencia del modelo de turbulencia, para lo cual se analizó dos tipos de modelos de turbulencia explicados en la Tabla 3.20, se escogió uno de los modelos establecidos, y luego se analizó la influencia del tipo de malla, donde se comparó dos tipos de malla como se indica en la Tabla 3.25, escogiendo así, el tipo de malla y el modelo de turbulencia que presente mejores resultados, y menores porcentajes de desviación en comparación con el modelo físico.

3.4.1 INFLUENCIA DEL MODELO DE TURBULENCIA.

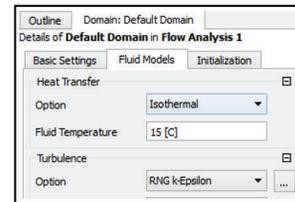
La malla que se utilizó para este análisis es una malla hexaédrica con una celda de 8mm, se proponen dos opciones para la selección del modelo de turbulencia, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3.20: Modelos de turbulencia a simular.

TIPO DE MALLA	MODELO DE TURBULENCIA	DENOMINACIÓN	# DE ELEMENTOS
Malla hexaédrica	K-epsilon RNG	MT1	813745
Malla hexaédrica	Shear Stress Transport. (SST)	MT2	

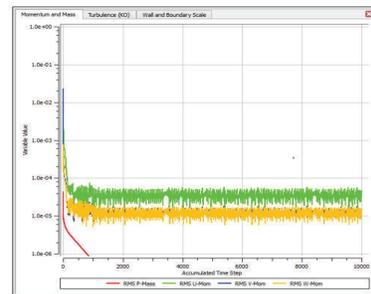
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

FIGURA 3.19: Modelo de Turbulencia K-epsilon RNG, (MT1)



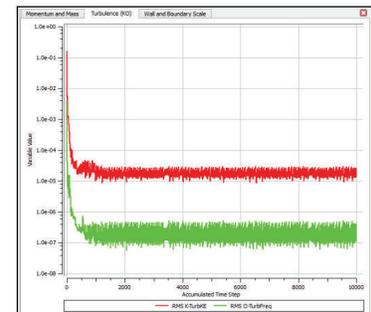
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

FIGURA 3.21: Gráfica de residuales, con 10000 iteraciones para el escenario de calibración, (Escenario 1)



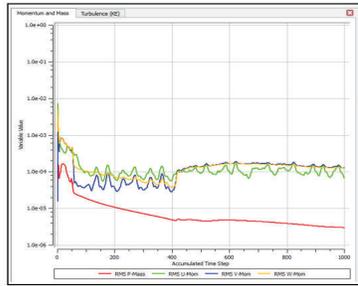
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

FIGURA 3.22: Gráfica de residuales de la energía cinética turbulenta y disipación turbulenta, con 10000 iteraciones para el escenario de calibración, (Escenario 1)



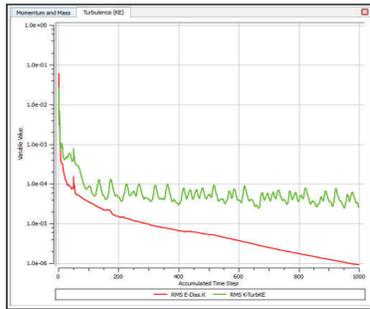
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

FIGURA 3.23: Gráfica de residuales para Modelo de Turbulencia MT1. Escenario 1.



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

FIGURA 3.24: Gráfica de residuales de la energía cinética turbulenta y disipación turbulenta, Modelo de turbulencia MT1. Escenario 1.



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Como se indica en la FIGURA 3.26, en el Modelo de Turbulencia MT2, los residuos se estabilizan en menos de 1.0E-05, ya que se visualiza una oscilación repetitiva y sin cambios, esto ocurre a las 1000 iteraciones. Este modelo presenta una convergencia más notoria a comparación del MT1.

• CHEQUEO DE LA CONTINUIDAD DEL FLUJO.

Para la calibración del modelo se realiza el chequeo de continuidad, es decir que el caudal que entra debe ser igual al caudal que sale de la estructura de interconexión.

Tabla 3.21: Resultados de la simulación numérica para el modelo de turbulencia MT1. Escenario 1.

MALLA HEXAÉDRICA (MT1)				
DATOS		RESULTADOS SIMULACIÓN		% DESVIACIÓN
Q Sarapullo	22,51 l/s	22,513 l/s		0,02
Q Toachi	35,80 l/s	35,80 l/s		0,00
Q Galería	58,29 l/s	58,29 l/s		0,00

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

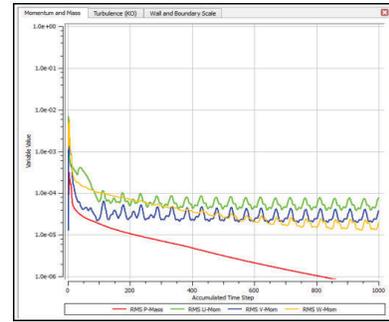
Tabla 3.22 : Resultados de la simulación numérica para el modelo de turbulencia MT2. Escenario 1.

MALLA HEXAÉDRICA (MT2)				
DATOS		RESULTADOS SIMULACIÓN		% DESVIACIÓN
Q Sarapullo	22,51 l/s	22,49 l/s		0,09
Q Toachi	35,80 l/s	35,8 l/s		0,0
Q Galería	58,29 l/s	58,290 l/s		0,0

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

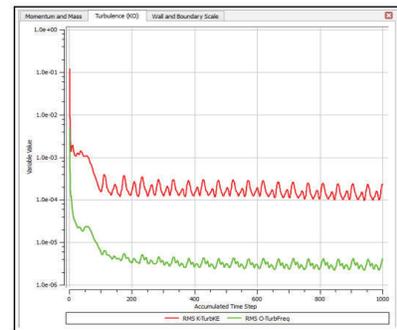
Como se puede observar en las gráficas anteriores el porcentaje de desviación es sumamente bajo, menores al 1%, para los dos modelos de turbulencia. Se presenta también los valores de velocidad en m/s y de presión en Pa, para el análisis de los dos modelos de turbulencia.

FIGURA 3.25: Gráficas de convergencia Modelo de turbulencia MT2. Escenario 1.



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

FIGURA 3.26: Gráficas de convergencia de la energía cinética turbulenta y disipación turbulenta, Modelo de turbulencia MT2. Escenario 1.



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Tabla 3.23: Cuadro comparativo de velocidades del flujo para los modelos de turbulencia MT1 y MT2.

Sección	MODELO FÍSICO	Velocidades (m/s)			
		MT1	MT2	% DESVIACIÓN MT1	% DESVIACIÓN MT2
Entrada Sarapullo	0,80	0,897	0,804	12,1	0,5
Salida Galería	1,20	1,216	1,21	1,3	0,8
Entrada Toachi	0,33	0,326	0,326	0,3	0,3

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Tabla 3.24: Cuadro comparativo de valores de presión para los modelos de turbulencia MT1 y MT2.

Ubicación	MODELO FÍSICO	Presiones (Pa)				
		MT1	MT2	% DESVIACIÓN MT1	% DESVIACIÓN MT2	
PIEZOMETRO	1	8690,83	8689,09	8688,93	0,02	0,02
	2	8661,43	8697,35	8639,07	0,41	0,26
	3	8700,62	8763,45	8716,42	0,72	0,18
	4	8671,23	8540,77	8509,91	1,50	1,86
	5	8191,13	8154,96	8104,32	0,44	1,06
	6	8249,92	8042,9	8008,77	2,51	2,92
	7	8073,55	7990,96	7941,29	1,02	1,64
	8	8044,16	8569,15	8575,27	6,53	6,60

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Se observa que los valores de velocidad para el modelo de turbulencia MT2, presenta porcentajes de desviaciones menores que el modelo de turbulencia MT1, y al comparar las presiones en los dos modelos para los diferentes piezómetros se puede apreciar que la menor desviación se encuentra en el piezómetro 1 (P1), correspondiente a la entrada Sarapullo, con una desviación del 0,02% tanto para el MT1, como para el MT2, por otro lado la mayor desviación se presenta en el piezómetro 8 con un valor de 6,53 % para el MT1, y con 6,60 % para el MT2.

**CONCLUSIÓN.**

Después del análisis de los resultados obtenidos con los dos modelos de turbulencia se escogió el modelo de turbulencia MT2, correspondiente al modelo de turbulencia Shear Stress Transport, debido a que presenta menores desviaciones con respecto a los valores de caudal y presión que el modelo de turbulencia MT1. A continuación se realizó el análisis de la influencia del tipo de mado.

**3.4.2 INFLUENCIA DEL TIPO DE MALLADO.**

Una vez escogido el modelo de turbulencia, se procedió a analizar el tipo de malla como se describe en la **Tabla 3.25**, las características de cada una de las mallas se indica a continuación.

**Tabla 3.25:** Tipos de mado a simular.

TIPO DE MALLA	MODELO DE TURBULENCIA	DENOMINACIÓN	# DE ELEMENTOS
Malla Hexaédrica	Shear Stress Transport. (SST)	MT2	813745
Malla Tetraédrica	Shear Stress Transport. (SST)	MT3	2830667

Elaborado por: Jenny Carrera.

En esta parte se indican las características de los dos tipos de mado utilizados para la calibración.

• **MALLA HEXAÉDRICA.**

En la tabla siguiente se describen el número de nodos, el número de elementos, el método de mado y el tamaño de celda utilizados para la elaboración de esta malla

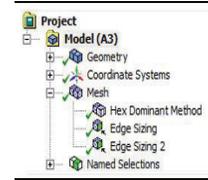
**Tabla 3.26:** Características del mado Hexaédrico.

Mado Hexaédrico	
Cuerpos	1
Nodos	746556
Elementos	813745
Método de mado	Hex Dominant
Tamaño de celda	8 mm

Fuente: (ANSYS-CFX)

Elaborado por: Jenny Carrera.

**FIGURA 3.27:** Mado Hexaédrico, (Métodos de Mado)



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

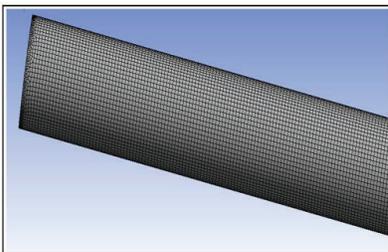
Se realizó un mado hexaédrico con un tamaño de celda de 8 mm en toda la geometría, y con el método **Edge Sizing** se refinó los contornos de la entrada Sarapullo, de la entrada Toachi, y de la salida de la Galería, este método refina los contornos, produciendo mayor cantidad de nodos y elementos donde se lo aplique, de esta manera se puede realizar una mejor representación del modelo real ya que se realiza una mejor discretización en el mado. Este método se puede observar con mayor claridad en las **FIGURAS 3.30** y **3.31**.

**FIGURA 3.28:** Mado Hexaédrico.



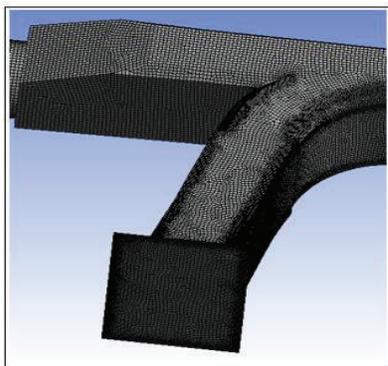
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

**FIGURA 3.29:** Mado Hexaédrico – Entrada Sarapullo.



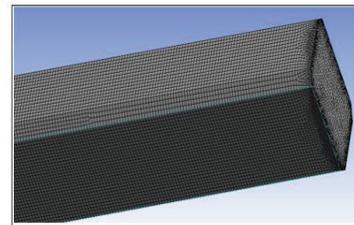
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

**FIGURA 3.30 :** Mado Hexaédrico – Entrada Toachi e Unión estructura de interconexión.



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

**FIGURA 3.31:** Mado Hexaédrico – Salida de la Galería.



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

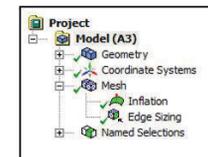
• **MALLA TETRAÉDRICA.**

**Tabla 3.27:** Características del mado Tetraédrico.

Mado Tetraédrico	
Cuerpos	1
Nodos	1094568
Elementos	2830667
Método de mado	Tetraedros
Tamaño de celda	10 mm

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

**FIGURA 3.32:** Mado Tetraédrico, (Métodos de Mado)

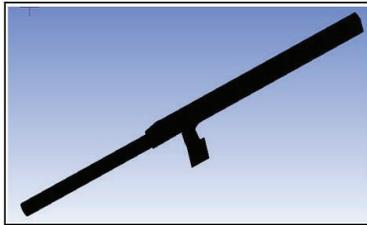


Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Este método genera mallas tetraedrales, es el único método que no deforma el dominio ya que éste incluye un factor de expansión que controla la tasa de

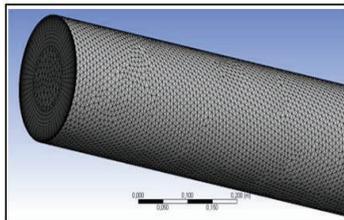
crecimiento del tamaño de los volúmenes de control. En la FIGURA 3.33, se indica los métodos utilizados para refinar la malla tetraédrica, en el caso de la entrada Sarapullo y la salida de la Galería se realizó el método de *Inflation*, el cual se basa en generar capas delgadas en los contornos e ir aumentando mientras se aleja de las paredes como se puede observar en la FIGURA 3.34, la celda más pequeña tiene un tamaño de 1.56mm, y en la FIGURA 3.36, en el caso de la entrada de la Bocatoma Toachi, se realizó el método *Sizing* en los contornos para refinar los mismos como se visualiza en la FIGURA 3.35.

FIGURA 3.33: Mallado Tetraédrico.



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

FIGURA 3.34: Mallado Tetraédrico – Entrada Sarapullo



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Se realizó un cálculo para determinar el espesor de la primera capa en la entrada de Sarapullo, y en la salida de la Galería para determinar que este espesor sea mayor al espesor de la sub capa laminar, el cual también ha sido calculado como se muestra a continuación.

**CÁLCULO DEL ESPESOR Y LA LONGITUD DEL ESPESOR DE LA CAPA LÍMITE.**

Los cálculos son realizados en los piezómetros 1 y 2 correspondientes a la entrada Sarapullo, se determina si el flujo es hidráulicamente liso o hidráulicamente rugoso, las fórmulas utilizadas han sido descritas en el capítulo 2 de este proyecto de titulación.

Datos:

- $Rh = 0,95 \text{ m}$
- $g = 9,77 \text{ m/s}^2$
- $kr = 0,0015 \text{ mm}$
- $v = 1,14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- $p_1/\gamma = 0,887 \text{ m}$
- $p_2/\gamma = 0,884 \text{ m}$

Se encuentra la velocidad de corte.

$$S = \frac{hf}{L} = \frac{0,887 - 0,884}{2,06} = \frac{0,003}{2,06} = 0,00146$$

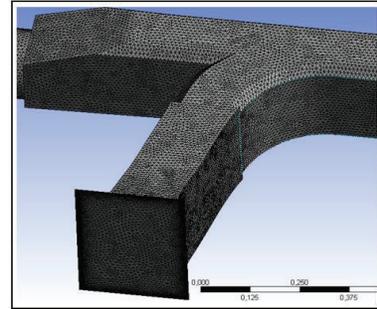
$$V_c = \sqrt{g * Rh * S}$$

$$V_c = \sqrt{9,77 * 0,95 * 0,00146} = 0,116 \text{ m/s}$$

$$\frac{V_c * kr}{v} = \frac{0,12 * 0,0000015}{1,14 \times 10^{-6}} = 0,1557 < 5$$

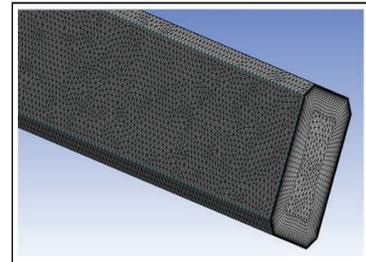
∴ Hidráulicamente lisa.

FIGURA 3.35: Mallado Tetraédrico – Entrada Toachi y Unión estructura de interconexión.



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

FIGURA 3.36: Mallado Tetraédrico – Salida de la Galería.



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Para el cálculo del espesor de la subcapa laminar se utiliza la ecuación indicada en el capítulo 2.

$$\frac{V_c * \partial_s}{v} = 11,6$$

Despejando  $\partial$  y reemplazando los valores se tiene que:

$$\partial_s = \frac{11,6 * 1,14 \times 10^{-6}}{0,116} = 0,000114 \text{ m} = 0,0114 \text{ cm.}$$

**CÁLCULO DEL ESPESOR DE REFINADO DESDE LAS PAREDES DE LA ESTRUCTURA.**

Es muy importante el mallado en los contornos de las estructuras a simular debido que cerca de las paredes de la misma ocurre el fenómeno de la capa límite, por ende al tener un mejor mallado en esta zona se puede representar de mejor manera dicho fenómeno. Para tener un mayor refinamiento en los bordes, adicional del mallado seleccionado en este caso una malla tetraédrica de 8mm, se aplica el método *Inflation*, en las caras de la entrada de Sarapullo y en la salida de la Galería, en el caso de la entrada de la Bocatoma Toachi, ya que el método anterior no presenta buenos resultados en esta entrada por la geometría asimétrica de la misma, se aplicó el método *Sizing*, para refinar los contornos de esta entrada.

Para determinar el espesor de la capa más delgada, en el método de *Inflation*, se aplica la fórmula de progresión aritmética, ya que el espesor de las capas aumenta gradualmente como se explica a continuación.

Datos:

- $i = \text{tasa de crecimiento} = 1,2$
- $n = \# \text{ capas} = 20$
- $H = \text{Altura total de capas} = 5 \text{ cm}$
- $h = \text{altura de la primera capa.}$

$$H = h * i^{n-1}$$

$$h = \frac{H}{i^{n-1}}$$

$$h = \frac{5 \text{ cm}}{1,2^{20-1}}$$

$$h = 0,156 \text{ cm} = 0,00156 \text{ m.}$$

• ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL MALLADO.

En las siguientes tablas se indica la calidad del mallado para las dos tipos de mallas seleccionadas. Se tomarán los parámetros Skewness, y Ortogonal Quality para comparar las dos tipos de mallas.

FIGURA 3.37: Detalle de la calidad del mallado hexaédrico.

Display		Display	
Display Style	Body Color	Display Style	Body Color
Defaults	Defaults	Defaults	Defaults
Sizing	Sizing	Sizing	Sizing
Quality	Quality	Quality	Quality
Check Mesh Quality	Yes, Errors	Check Mesh Quality	Yes, Errors
Target Skewness	Default (0.900...)	Target Skewness	Default (0.900...)
Smoothing	Medium	Smoothing	Medium
Mesh Metric	Skewness	Mesh Metric	Orthogon...
Min	5,3684e-006	Min	5,0647e-010
Max	1	Max	1
Average	0,25731	Average	0,82385
Standard Deviation	0,28278	Standard Deviation	0,29402

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

FIGURA 3.38: Detalle de la calidad del mallado tetraédrico.

Display		Display	
Display Style	Body Color	Display Style	Body Color
Defaults	Defaults	Defaults	Defaults
Sizing	Sizing	Sizing	Sizing
Quality	Quality	Quality	Quality
Check Mesh Quality	Yes, Errors	Check Mesh Quality	Yes, Errors
Target Skewness	Default (0.900...)	Target Skewness	Default (0.900...)
Smoothing	Medium	Smoothing	Medium
Mesh Metric	Skewness	Mesh Metric	Orthog...
Min	5,3684e-006	Min	5,2147e-008
Max	1	Max	0,99622
Average	0,25731	Average	0,78033
Standard Deviation	0,28278	Standard Deviation	0,13443

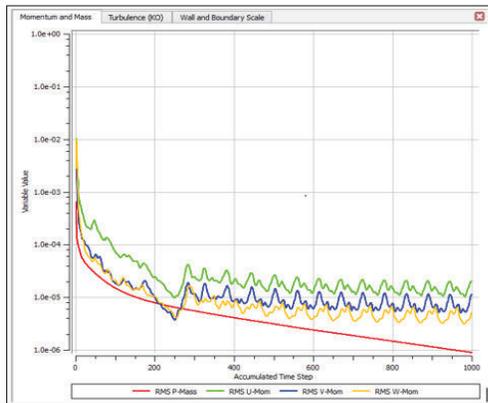
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

En la FIGURA 3.40 se observan los elementos que se encuentran en el rango 0.50 a 1 según el parámetro Skewness, debido a que a pesar de que la malla posee un excelente calidad, existirán elementos que estén fuera de esta calidad, se observa también que estos elementos son más dispersos que los de la figura anterior.

• ANÁLISIS DE CONVERGENCIA.

Se realiza la comparación de esta nueva malla MT3, con la malla escogida anteriormente MT2, comparando caudales (chequeo de continuidad), velocidades promedio y presiones como se muestra en las tablas siguientes.

FIGURA 3.41: Gráficas de convergencia Modelo de turbulencia MT3.

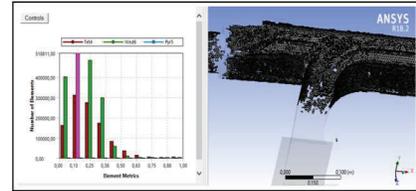


Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Cuando se trata de un mallado hexaédrico el valor relevante para calificar la calidad de la malla es Ortogonalidad Quality y se puede observar en la FIGURA 3.37, que tiene un valor promedio de 0.82, que de acuerdo a la Tabla 2.2 la calidad de la celda es muy buena. En el caso de una malla tetraédrica el parámetro relevante es Skewness cuyo valor en la FIGURA 3.38, presenta un valor promedio de 0.25, y de acuerdo a la Tabla 2.3 la calidad de la celda es excelente.

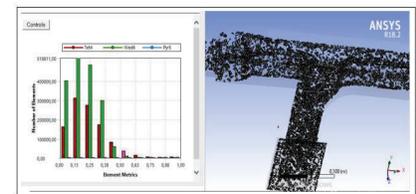
En la FIGURA 3.39, se indican los elementos que están dentro del rango de excelencia según el parámetro Skewness, es decir menores a 0.25 por lo tanto que se encuentran dentro de los valores recomendables en la calidad del mallado

FIGURA 3.39: Elementos de Skewness en el dominio.



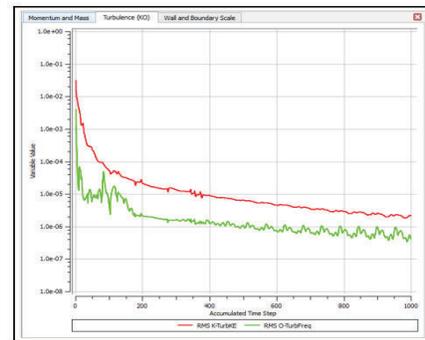
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

FIGURA 3.40: Elementos de Skewness en el dominio, valores fuera de la calidad del mallado.



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

FIGURA 3.42: Gráficas de convergencia Modelo de turbulencia MT2.



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

• CHEQUEO DE LA CONTINUIDAD DEL FLUJO.

En la siguiente tabla se puede observar los valores de caudales de la simulación numérica del modelo MT3, comparados con los datos de la modelación física, donde el porcentaje de desviación entre estos valores es de 0,01%.

Tabla 3.28: Resultados de la simulación numérica para el modelo de turbulencia MT2.

MODELO SELECCIONADO ( MALLA TETRAÉDRICA) MT3				
DATOS		RESULTADOS SIMULACIÓN		% DESVIACIÓN
Q Sarapullo	22,51 l/s	22,5116	l/s	0,01
Q Toachi	35,80 l/s	35,8	l/s	0,00
Q Galeria	58,29 l/s	58,29	l/s	0,00

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

**Tabla 3.29:** Cuadro comparativo de velocidades promedio para los modelos de turbulencia MT2 y MT3.

SECCIÓN	VELOCIDADES (m/s)				
	MODELO FÍSICO	MT3	MT2	% DESVIACIÓN MT3	% DESVIACIÓN MT2
Entrada Sarapullo	0,80	0,85	0,81	6,2	1,3
Salida Galería	1,20	1,3	1,22	8,3	1,7
Entrada Toachi	0,33	0,326	0,326	0,3	0,3

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

**Tabla 3.30:** Cuadro comparativo de valores de presión para los modelos de turbulencia MT2 y MT3.

	PRESIONES (Pa)				
	MODELO FÍSICO	MT2	MT3	% DESVIACIÓN MT2	% DESVIACIÓN MT3
1	8690,83	8688,93	8679,19	0,02	0,13
2	8661,43	8639,07	8649,85	0,26	0,13
3	8700,62	8716,42	8733,29	0,18	0,38
4	8671,23	8509,91	8575,25	1,86	1,11
5	8191,13	8104,32	8122,98	1,06	0,83
6	8249,92	8008,77	8012,86	2,92	2,87
7	8073,55	7941,29	7934,65	1,64	1,72
8	8044,16	8575,27	8615,38	6,60	7,10

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Al comparar los valores de velocidades de MT2, con el MT3, se puede ver que los valores del modelo MT3, presentan un porcentaje de desviación mayor que el modelo MT2, y al comparar los valores de presión el porcentaje de desviación mayor es el piezómetro 8 (P8) para el modelo de MT2.

**CONCLUSIÓN.**

Luego de la comparación entre los modelos MT2 y MT3, se observó que los porcentajes de desviación para caudales eran menores en el modelo MT3, para presiones este porcentaje de desviación era similar en los dos modelos. Los

porcentajes de desviación con respecto a velocidades promedio son menores para el modelo MT2. Sin embargo, se decidió escoger el modelo MT3, por su mejor calidad del mallado, tomando en cuenta que la diferencia entre porcentajes de desviación no son tan relevantes y también se elige este mallado por la complejidad de la geometría.

Es así que una vez calibrado el modelo se escoge el modelo de turbulencia Shear Stress Transport, con una malla tetraédrica y con estas condiciones se modelaron todos los escenarios del plan de pruebas propuesto para la simulación numérica.

**3.5 ESCENARIOS PARA LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.**

Para la simulación numérica los escenarios escogidos son 9, como se mencionó en el Plan de Pruebas Ejecutado, numeral 3.2.1.3. En la siguiente tabla se muestran los valores de tasa de flujo másico en kg/s, para la entrada Toachi y la salida de la Galería y el valor de la presión en Pa, para la entrada Sarapullo.

**Tabla 3.31:** Datos de ingreso para la simulación de todos los escenarios.

ESCENARIOS PARA LA SIMULACIÓN NUMÉRICA				
Ubicación	Escenario	Dato de Ingreso	Unidad	Observaciones
SARAPULLO	Escenario 1	8690,83	Pa	Trabajando tres turbinas en Sarapullo, funcionando tres turbinas con el caudal de diseño en Alluriquín. Fase(1,2)
TOACHI		35,7689	kg/s	
GALERIA		58,2393	kg/s	
SARAPULLO	Escenario 2	8151,94	Pa	Trabajando al 45% una turbina en Sarapullo, funcionando una turbina al 45% en Alluriquín. Fase(1,2)
TOACHI		7,3036	kg/s	
GALERIA		10,6208	kg/s	
SARAPULLO	Escenario 3	8779,01	Pa	Trabajando una turbina en Sarapullo, funcionando una turbina en Alluriquín. Fase(1,2)
TOACHI		13,5382	kg/s	
GALERIA		20,9717	kg/s	
SARAPULLO	Escenario 4	9112,14	Pa	Trabajando dos turbinas en Sarapullo, funcionando dos turbinas en Alluriquín. Fase(1,2)
TOACHI		24,5786	kg/s	
GALERIA		39,4756	kg/s	
SARAPULLO	Escenario 5	9082,75	Pa	Trabajando al 45% de una turbina en Sarapullo, funcionando una turbina en Alluriquín.
TOACHI		17,5347	kg/s	
GALERIA		20,8518	kg/s	
SARAPULLO	Escenario 6	9180,73	Pa	Trabajando una turbina en Sarapullo, funcionando dos turbinas en Alluriquín. Fase(1,2)
TOACHI		32,0721	kg/s	
GALERIA		39,5256	kg/s	
SARAPULLO	Escenario 7	8671,23	Pa	Trabajando dos turbinas en Sarapullo funcionando dos turbinas con el caudal de diseño y una tercera al 60%. Fase(1,2)
TOACHI		35,7489	kg/s	
GALERIA		50,6459	kg/s	

SARAPULLO	Escenario 8	8881,89	Pa	Trabajando al 45% una turbina en Sarapullo, funcionando tres turbinas en Alluriquín. Fase(1,2)
TOACHI		54,8922	kg/s	
GALERIA		58,2093	kg/s	
SARAPULLO	Escenario 9	0,00	Pa	Funcionamiento de tres turbinas con el caudal de diseño, en Alluriquín (captado únicamente del embalse Toachi.)
TOACHI		10300	Pa	
GALERIA		58,4791	kg/s	

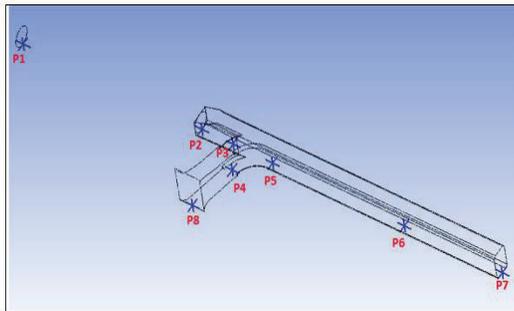
Fuente: (Informe Fase 2,2011)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

**3.5.1 MODELACIÓN DE LOS ESCENARIOS.**

Las presiones son tomadas en la base de la estructura de unión, en concordancia con la ubicación de los piezómetros en el modelo físico como se indica en la FIGURA 3.42.

Se realiza la modelación de los escenarios mencionados anteriormente, seis escenarios de la fase 2 y tres escenarios de la fase 1.

**FIGURA 3.43:** Ubicación de puntos piezométricos en el modelo numérico.



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

A continuación, desde la Tabla 3.32 hasta la Tabla 3.40 se muestran los valores de presiones en (Pa) para cada uno de los escenarios simulados (9 escenarios) y la comparación de estos escenarios con los resultados del modelo físico.

**Tabla 3.32:** Valores de presiones (Pa) para el ESCENARIO 1.

ESCENARIO 1				
ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO - ALLURIQUÍN.				
PRESIONES (Pa)				
Pto	MODELO FÍSICO	MODELO NUMÉRICO	% DESVIACIÓN	
PIEZÓMETRO	P1	8690,83	8679,19	0,13
	P2	8661,43	8649,85	0,13
	P3	8700,62	8733,29	0,38
	P4	8671,23	8575,25	1,11
	P5	8191,13	8122,98	0,83
	P6	8249,92	8012,86	2,87
	P7	8073,55	7934,65	1,72
	P8	8044,16	8615,38	7,10

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Como se mencionó anteriormente en el literal 3.2.1.3, en los escenarios 2, 5, 9, no existe toma de datos de cargas piezométricas en el piezómetro 8 (P8) para el modelo físico, por tanto a pesar de que en el modelo numérico si se tomó este valor, no se puede hacer una comparación de presiones en este punto, como se puede ver el las Tablas 3.33, 3.36, 3.40.

**Tabla 3.33:** Valores de presiones (Pa) para el ESCENARIO 2.

ESCENARIO 2				
ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO - ALLURIQUÍN.				
PRESIONES (Pa)				
Pto	MODELO FÍSICO	MODELO NUMÉRICO	% DESVIACIÓN	
PIEZÓMETRO	P1	8151,94	8147,15	0,06
	P2	8151,94	8199,08	0,58
	P3	8151,94	8205,15	0,65
	P4	8151,94	8208,87	0,70
	P5	8142,14	8194,11	0,64
	P6	8137,24	8190,70	0,66
	P7	8137,24	8188,64	0,63
	P8	----	8226,25	----

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Tabla 3.34: Valores de presiones (Pa) para el ESCENARIO 3.

ESCAMENARIO 3				
ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO - ALLURIQUÍN.				
PRESIONES (Pa)				
Pto	MODELO FÍSICO	MODELO NUMÉRICO	% DESVIACIÓN	
PIEZÓMETRO	P1	8779.01	8759.62	0,22
	P2	8749.61	8757.22	0,09
	P3	8759.41	8768.19	0,10
	P4	8749.61	8738.66	0,13
	P5	8710.42	8682.14	0,32
	P6	8720.22	8661.95	0,67
	P7	8700.62	8651.35	0,57
	P8	8700.62	8759.82	0,68

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Tabla 3.35: Valores de presiones (Pa) para el ESCENARIO 4.

ESCAMENARIO 4				
ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO - ALLURIQUÍN.				
PRESIONES (Pa)				
Pto	MODELO FÍSICO	MODELO NUMÉRICO	% DESVIACIÓN	
PIEZÓMETRO	P1	9112.14	9100.56	0,13
	P2	9072.95	9137.12	0,71
	P3	9092.54	9165.36	0,80
	P4	9082.75	9097.75	0,17
	P5	8886.79	8891.32	0,05
	P6	8916.18	8837.05	0,89
	P7	8847.59	8804.14	0,49
	P8	8832.90	9126.34	3,32

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Tabla 3.36: Valores de presiones (Pa) para el ESCENARIO 5.

ESCAMENARIO 5				
ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO - ALLURIQUÍN.				
PRESIONES (Pa)				
Pto	MODELO FÍSICO	MODELO NUMÉRICO	% DESVIACIÓN	
PIEZÓMETRO	P1	9082.75	9072.72	0,11
	P2	9082.75	9089.39	0,07
	P3	9082.75	9091.17	0,09
	P4	9063.15	9052.39	0,12
	P5	9023.96	9013.19	0,12
	P6	9004.36	8995.73	0,10
	P7	8994.56	8981.12	0,15
	P8	-----	9076.52	-----

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Tabla 3.37: Valores de presiones (Pa) para el ESCENARIO 6.

ESCAMENARIO 6				
ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO - ALLURIQUÍN.				
PRESIONES (Pa)				
Pto	MODELO FÍSICO	MODELO NUMÉRICO	% DESVIACIÓN	
PIEZÓMETRO	P1	9180.73	9154.41	0,29
	P2	9161.13	9566.00	4,42
	P3	9170.93	9572.57	4,38
	P4	9112.14	9432.56	3,52
	P5	8945.57	9274.37	3,68
	P6	8984.77	9233.48	2,77
	P7	8886.79	9183.79	3,34
	P8	8876.99	9471.05	6,69

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Tabla 3.38: Valores de presiones (Pa) para el ESCENARIO 7.

ESCAMENARIO 7				
ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO - ALLURIQUÍN.				
PRESIONES (Pa)				
Pto	MODELO FÍSICO	MODELO NUMÉRICO	% DESVIACIÓN	
PIEZÓMETRO	P1	8671.23	8654.21	0,20
	P2	8632.04	8762.12	1,51
	P3	8651.63	8786.57	1,56
	P4	8587.95	8611.71	0,28
	P5	8269.51	8311.97	0,51
	P6	8328.30	8226.28	1,22
	P7	8181.33	8155.44	0,32
	P8	8166.63	8652.49	5,95

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Tabla 3.39: Valores de presiones (Pa) para el ESCENARIO 8.

ESCAMENARIO 8				
ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO - ALLURIQUÍN.				
PRESIONES (Pa)				
Pto	MODELO FÍSICO	MODELO NUMÉRICO	% DESVIACIÓN	
PIEZÓMETRO	P1	8881.89	8866.42	0,17
	P2	8872.09	8867.74	0,05
	P3	8876.99	8849.51	0,31
	P4	8661.43	8534.31	1,47
	P5	8445.88	8210.92	2,78
	P6	8573.25	8234.88	3,95
	P7	8338.10	8147.86	2,28
	P8	8318.50	8612.47	3,53

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Tabla 3.40: Valores de presiones (Pa) para el ESCENARIO 9.

ESCAMENARIO 9				
ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO - ALLURIQUÍN.				
PRESIONES (Pa)				
Pto	MODELO FÍSICO	MODELO NUMÉRICO	% DESVIACIÓN	
PIEZÓMETRO	P1	-----	10747.40	-----
	P2	-----	10941.30	-----
	P3	10405.48	10790.60	3,70
	P4	10209.52	10250.60	0,40
	P5	10042.95	10041.20	0,02
	P6	10199.20	10212.90	0,13
	P7	9944.98	10354.60	4,12
	P8	-----	10226,3	-----

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

De la comparación de los valores de presión entre el modelo físico y la simulación numérica, se obtuvo que el porcentaje de desviación mayor son para el escenario 1, con un valor de 7.10% en el piezómetro 8 (P8), además se observa que los valores de presión obtenidos para el escenario 9, no se asemejan a los valores del modelo físico para este escenario, siendo así que los porcentajes de desviación resultan ser incoherentes. Se muestra también los valores de caudal para cada uno de los escenarios, con su porcentaje de desviación con relación al modelo físico.

Tabla 3.41: Verificación de la continuidad para los diferentes escenarios.

VERIFICACIÓN DE LA CONTINUIDAD				
Caudal (l/s)				
UBICACIÓN	ESCAMENARIO	Modelo Físico	Modelo Numérico	% Desviación
SARAPULLO	ESCAMENARIO 1	22.51	22.52	0.03
		35.80	35.80	0.00
		58.29	58.29	0.00
SARAPULLO	ESCAMENARIO 2	3.32	3.32	0.00
		7.31	7.71	5.48
		10.63	10.63	0.00
SARAPULLO	ESCAMENARIO 3	7.44	7.21	3.11
		13.55	13.55	0.00

GALERIA		20,99	20,99	0,00
SARAPULLO	ESCENARIO 4	14,91	16,30	9,30
TOACHI		24,60	24,60	0,00
GALERIA		39,51	39,51	0,00
SARAPULLO	ESCENARIO 5	3,32	3,10	6,66
TOACHI		17,55	17,55	0,00
GALERIA		20,87	20,87	0,00
SARAPULLO	ESCENARIO 6	7,44	6,91	7,19
TOACHI		32,10	32,10	0,00
GALERIA		39,56	39,56	0,00
SARAPULLO	ESCENARIO 7	14,91	15,83	6,18
TOACHI		35,78	35,78	0,00
GALERIA		50,69	50,69	0,00
SARAPULLO	ESCENARIO 8	3,32	3,49	5,04
TOACHI		54,94	54,94	0,00
GALERIA		58,26	58,26	0,00
SARAPULLO	ESCENARIO 9	0	0,00	0,00
TOACHI		58,53	60,90	4,23
GALERIA		58,53	58,53	0,00

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

- Se comparó los valores de carga piezométrica en los puntos establecidos, del modelo físico y de la simulación numérica, obteniendo porcentajes de desviación aceptables menores al 7%.
- Se escogió la malla tetraédrica debido a que los errores en los puntos piezométricos eran menores, además que esta malla cuenta con refinamientos en los contornos de todo el dominio computacional.

3.6 CONCLUSIONES.

- El programa ANSYS CFX se basa en tres etapas para el computo numérico del dominio computacional como son; Pre – procesamiento, procesamiento y post – procesamiento. Las ecuaciones de Navier – Stokes son resueltas mediante la simulación numérica por el método de los volúmenes finitos. La discretización del dominio se realizó con un mallado no estructurado por el método tetraédrico, y la etapa del procesamiento se soluciona en análisis estacionario el flujo de fluidos.
- El modelo de turbulencia seleccionado fue el modelo Shear Stress Trasport, ya que los porcentajes de desviación fueron menores a comparación de los resultados con el modelo de turbulencia K-epsilon RNG.
- La calibración y validación de resultados se realizó mediante los datos del modelo físico y los resultados obtenidos en la simulación mediante ANSYS CFX, se chequeó la continuidad del flujo para los tres casos establecidos en la calibración, dando valores menores al 1% en la malla tetraédrica seleccionada.

CAPITULO 4  
RESULTADO Y DISCUSIONES

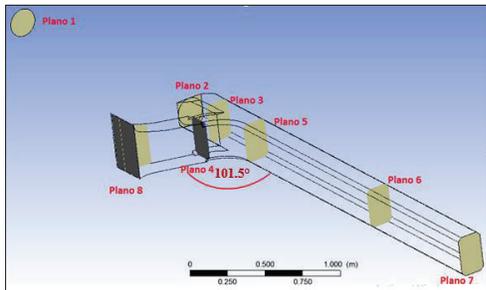
4.1 ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS DEL FLUJO.

4.1.1 RESULTADOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES.

ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ESCENARIO 1. (Bocatoma Toachi,  $Q_{modelo}=35,80$  l/s. Sarapullo,  $Q_{modelo}=22,52$  l/s. Galería,  $Q_{modelo}=58,29$  l/s)

Los coeficientes de pérdida local en la estructura de unión de flujos se obtienen realizando un balance de energía entre dos secciones transversales que encierran a la unión de flujos. Con el propósito de emplear la ecuación de energía es necesario realizar un análisis de la distribución de velocidad y la distribución de presiones en las secciones transversales de interés, es decir, en los puntos en donde se tiene un registro mediciones de presiones en el modelo físico. En la FIGURA 4.1 se indican las secciones transversales antes mencionadas.

FIGURA 4.1: Ubicación de Planos en los puntos de medición de presiones.

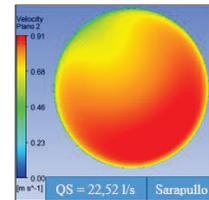


Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Para el análisis del coeficiente de pérdida local de la unión del flujo que va desde el túnel Sarapullo a la Galería de interconexión se elige el plano 2 (Sarapullo) y el plano 7 (Galería) debido a que en estas secciones se observan una distribución de velocidades y presiones uniformes. Mientras que para el análisis del coeficiente de pérdida local de la unión del flujo que va desde la Bocatoma Toachi a la Galería de interconexión se elige el plano 4 (Toachi) y el plano 7 (Galería).

A continuación en la FIGURA 4.2 se muestra la distribución de velocidades en el plano 2 para el escenario 1 del plan de pruebas establecido. Se observa que en el túnel sarapullo para el caudal en modelo de 22,52 l/s que corresponde a un caudal de 40 m³/s en prototipo, la velocidad promedio en ésta sección es de 0.79 m/s y una velocidad máxima de 0,91 m/s. Los valores de velocidad en las cercanías de los contornos de este plano tiene valores pequeños mientras que en el centro las velocidades son mayores como se observa con el color naranja y rojo.

FIGURA 4.2: Distribución de velocidades Plano 2. Escenario 1.

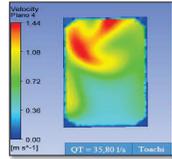


Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

En la FIGURA 4.3, se observa la distribución de velocidades para el escenario 1, en la sección del plano 4 (Bocatoma Toachi) por donde ingresa un caudal en modelo de 38,50 l/s que corresponde a un caudal de 64 m³/s en prototipo, la velocidad promedio en ésta sección es de 0.78 m/s y una velocidad máxima de 1.43 m/s. El color azul en los contornos de la sección indica la influencia de la capa límite en las cercanía del contorno, es decir, en esta zona de presenta importantes gradientes de velocidad. La mayor velocidad se muestra de color rojo y se

localiza en la parte superior de la sección esto puede deberse a que inmediatamente aguas abajo de esta sección se tiene una curvatura en la geometría del túnel Tochi hacia el lado derecho por lo que en la parte interna de la curva se observa una tendencia a disminuir la velocidad del flujo.

FIGURA 4.3: Distribución de velocidades Plano 4. Escenario 1.

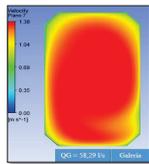


Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

En la FIGURA 4.4, se observa la distribución de velocidades en la sección del plano 7 (Galería), por donde pasa un caudal en modelo de 58,29 l/s que corresponde a un caudal de 104 m<sup>3</sup>/s en prototipo, la velocidad promedio en ésta sección es de 1,28 m/s y una velocidad máxima de 1,46 m/s.

Los valores de velocidad en los contornos de este plano tiene valores pequeños tendientes a cero, mientras que en el centro las velocidades son mayores como se observa con el color rojo, en este plano se observa una distribución de velocidades uniforme.

FIGURA 4.4: Distribución de velocidades Plano 7. Escenario 1



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Tabla 4.2: Resultados del modelo numérico. ANSYS CFX. Valores de carga piezométrica, para cada Escenario.

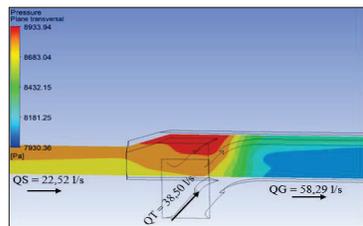
ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO - ALLURIQUIN.									
Nivel (m)									
Escenarios									
Pto	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P1	0,886	0,832	0,894	0,929	0,926	0,934	0,883	0,905	1,097
P2	0,883	0,837	0,894	0,933	0,928	0,976	0,894	0,905	1,117
P3	0,891	0,837	0,895	0,935	0,928	0,977	0,897	0,903	1,101
P4	0,875	0,838	0,892	0,929	0,924	0,963	0,879	0,871	1,046
P5	0,829	0,836	0,886	0,907	0,920	0,947	0,848	0,838	1,025
P6	0,818	0,836	0,884	0,902	0,918	0,942	0,840	0,840	1,042
P7	0,810	0,836	0,883	0,899	0,917	0,937	0,832	0,832	1,057
P8	0,879	0,840	0,894	0,931	0,926	0,967	0,883	0,879	1,044

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

4.1.3 DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES.

Para visualizar la distribución de presiones a lo largo del túnel Sarapullo y de la Galería de interconexión en la FIGURA 4.5 se muestra un corte longitudinal de estas estructuras para el escenario 1. Además, en el Anexo 3 se presenta la distribución de presiones en los cortes longitudinales para el resto de escenarios que conforman el plan de pruebas.

FIGURA 4.5: Distribución de presiones en el eje longitudinal de la Estructura de unión. Escenario 1.



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Para encontrar el valor de la velocidad promediada se ha utilizado la función **areaAve**, en cada uno de los planos dispuestos en los puntos piezométricos.

En la **Tabla 4.1** se muestran los valores de velocidad promediados en cada plano para los nueve escenarios descritos en el plan de pruebas.

Tabla 4.1: Valores de velocidad promediados en la sección, ubicados en cada piezómetro, para cada escenario.

ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO - ALLURIQUIN.										
Velocidades Promediadas (m/s)										
Escenarios										
PIEZÓMETRO	Pto	1	2	3	4	5	6	7	8	9
PIEZÓMETRO	Plano 1	0,801	0,395	0,283	0,584	0,148	0,612	0,612	0,198	0,930
	Plano 2	0,663	0,214	0,224	0,438	0,097	0,220	0,438	0,123	0,889
	Plano 3	0,704	0,114	0,253	0,478	0,270	0,516	0,631	0,818	0,737
	Plano 4	0,796	0,075	0,300	0,546	0,388	0,712	0,793	1,215	1,330
	Plano 5	1,274	0,229	0,461	0,865	0,469	0,886	1,122	1,347	1,402
	Plano 6	1,260	0,228	0,453	0,855	0,455	0,864	1,101	1,279	1,287
	Plano 7	1,256	0,228	0,452	0,852	0,453	0,859	1,096	1,269	1,276
	Plano 8	0,838	0,083	0,315	0,569	0,407	0,740	0,824	1,260	1,341

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

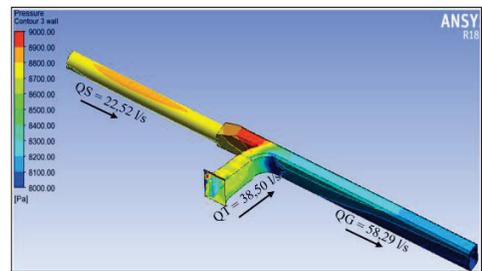
4.1.2 RESULTADOS DE CARGAS PIEZOMÉTRICAS.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la modelación numérica tridimensional mediante el uso del programa ANSYS CFX, sobre los valores de la carga piezométrica en los puntos donde se ubicaron los piezómetros en el modelo físico. En el modelo numérico se procedió a obtener las presiones en dichos puntos con el uso del comando "probe" y posteriormente estos valores se los transformó en carga de presión.

En la **Tabla 4.2**, se muestra los valores de carga piezométrica para los nueve escenarios descritos en el plan de pruebas.

En la FIGURA 4.5, se observa que las mayores presiones (en color rojo), se encuentran en la parte superior de la zona de unión de los dos flujos, debido a que al ingresar 38,50 l/s por la Bocatoma Toachi y 22,52 l/s desde la entrada de Sarapullo se produce una zona de estancamiento en esta zona y las presiones tienden a incrementarse. Hacia aguas debajo de la estructura de unión se observa que las presiones disminuyen.

FIGURA 4.6: Distribución de presiones en el contorno de la Estructura de unión. Escenario 1.



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

En la FIGURA 4.6 se indica las presiones en los contornos de la tubería, y se puede observar que las mayores presiones se encuentran en los tramos de Sarapullo y Toachi hasta llegar a la interconexión de estos dos flujos, después de la unión de estos flujos la presión disminuye en el tramo de la galería de interconexión.

4.2 EVALUACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE PÉRDIDA DE ENERGÍA LOCAL DETERMINADAS PARA LA ESTRUCTURA DE INTERCONEXIÓN DE FLUJOS.

Para encontrar el valor de los coeficientes locales  $k_{ij}$ , (siendo  $i$  la posición del primer punto piezométrico, y  $j$  la posición del segundo punto piezométrico), se utiliza la

ecuación de energía entre los puntos donde se tiene medición, los valores de carga de presión son valores obtenidos de la simulación numérica según corresponda, para la carga de velocidades, la velocidad tomada es la velocidad promediada en cada uno de los planos.

La resolución de las pérdidas por fricción se lo realiza obteniendo el valor de  $\lambda$  aplicando la ecuación de Colebroke y White.

El coeficiente de pérdida local se calcula aplicando las ecuaciones que se muestran a continuación.

$$E_i = E_j + \Delta Hf \quad \text{Ecuación de Energía.}$$

$$z_i + \frac{p_i}{\gamma} + \frac{V_i^2}{2g} = z_j + \frac{p_j}{\gamma} + \frac{V_j^2}{2g} + \Delta Hf$$

$$z_i + \frac{p_i}{\gamma} + \frac{V_i^2}{2g} = z_j + \frac{p_j}{\gamma} + \frac{V_j^2}{2g} + hf + hL$$

$$z_i + \frac{p_i}{\gamma} + \frac{V_i^2}{2g} = z_j + \frac{p_j}{\gamma} + \lambda \frac{L}{4Rh} * \frac{V_j^2}{2g} + k_{ij} * \frac{V_j^2}{2g}$$

$$\frac{E_i - E_j - h_f}{\frac{V_j^2}{2g}} = k_{ij}$$

El resultado del modelo numérico de la energía (E  $E_i$  y  $E_j$ ) se obtiene utilizando la opción **Total Pressure**, que corresponde al resultado de la energía total, es decir, es la suma entre la carga de presión más la carga de velocidad. Para determinar la pérdida por fricción  $h_f$ , y la carga de velocidad  $\frac{V_j^2}{2g}$  se utiliza la velocidad promediada en cada sección.

Para determinar el coeficiente de pérdida local  $k_{27}$ , se obtiene la energía en el plano 2 (piezómetro 2), ubicado en el tramo de Sarapullo y en el plano 7 (piezómetro 7), ubicado en el tramo de la galería de interconexión (ver **FIGURA 4.7**). La distancia entre estas dos secciones es de 3,42 m. Es importante tener muy en cuenta que los coeficientes de pérdida local  $k_{27}$  que se obtienen en este estudio considera que la unión de flujos se desarrolla en una longitud de 18 veces el diámetro del túnel Sarapullo ( $18 * D_s$ ), donde  $D_s$  corresponde al diámetro del túnel Sarapullo.

estudio considera que la unión de flujos se desarrolla en una longitud de 11 veces la altura del túnel Toachi ( $11 * H_T$ ).

**FIGURA 4.8:** Esquema de la ubicación del piezómetro 4 y el piezómetro 7.



Fuente: (CIERHI - EPN, 2011)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

En la **Tabla 4.4**, se reporta los resultados obtenidos de los coeficientes de pérdida local  $k_{47}$ , para todo el rango de caudales analizado.

**Tabla 4.4:** Valores del coeficiente de pérdida local ( $k_{47}$ )

Escenario	E4	E7	hf	V(7) <sup>2</sup> /2g	K47
1	0,92	0,90	0,02	0,08	-0,01
2	0,84	0,84	0,00	0,00	0,06
3	0,91	0,90	0,00	0,03	0,22
4	0,95	0,94	0,01	0,04	-0,01
5	0,94	0,94	0,00	0,01	0,20
6	1,00	0,98	0,01	0,04	0,13
7	0,92	0,90	0,01	0,06	0,05
8	0,96	0,92	0,02	0,08	0,23
9	1,20	1,14	0,02	0,08	0,50

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

En el Anexo 5 se presentan los demás valores de coeficiente de pérdida local  $k_{ij}$  los cuales fueron tomados en los distintos puntos piezométricos los coeficientes de pérdida local que se muestran en el Anexo 5 son:  $k_{35}, k_{36}, k_{37}, k_{46}, k_{15}, k_{16}, k_{17}, k_{27}, k_{37}, k_{47}, k_{85}, k_{86}, k_{87}$ .

**FIGURA 4.7:** Esquema de la ubicación del piezómetro 2 y el piezómetro 7.



Fuente: (CIERHI - EPN, 2011)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

En la **Tabla 4.3**, se reporta los resultados obtenidos de los coeficientes de pérdida local  $k_{27}$ , para todo el rango de caudales analizado. Se observa que los valores de los coeficientes de pérdida  $k_{27}$ , son negativos para los escenarios 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 y para el escenario 9, el valor de coeficiente de pérdida es positivo, esto se debe a que la energía en el plano 7 es menor que la energía en el plano 2.

**Tabla 4.3:** Resultado del coeficiente de pérdida local ( $k_{27}$ ).

Escenario	E2	E7	hf	V(7) <sup>2</sup> /2g	K27
1	0,916	0,900	0,019	0,08	-0,04
2	0,840	0,843	0,001	0,004	-0,81
3	0,903	0,903	0,003	0,01	-0,27
4	0,951	0,945	0,009	0,04	-0,09
5	0,935	0,937	0,003	0,01	-0,43
6	0,986	0,985	0,009	0,04	-0,22
7	0,913	0,904	0,015	0,06	-0,09
8	0,913	0,920	0,019	0,08	-0,32
9	1,160	1,139	0,019	0,08	0,02

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

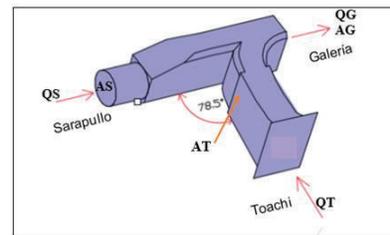
De la misma manera para determinar el coeficiente de pérdida local  $k_{47}$ , se obtiene la energía en el plano 4 (piezómetro 4), ubicado en el tramo de Toachi y en el plano 7 (piezómetro 7), ubicado en el tramo de la galería de interconexión (ver **FIGURA 4.8**). La distancia entre los planos 4 y 7 es 3,05 m entre ellos. Es importante tener muy en cuenta que los coeficientes de pérdida local ( $K_{27}$ ) que se obtienen en este

• **GRÁFICOS COMPARATIVOS.**

**COEFICIENTES DE PÉRDIDA LOCAL CALCULADOS CON BASE EN LAS ECUACIONES EMPÍRICAS DE IDELCHIK**

En la **FIGURA 4.9** se indican la simbología con que se denomina los caudales y las áreas para las entradas y la salida de la estructura de unión. Es así que los caudales para Sarapullo, Toachi y Galería se denominan QS, QT, QG respectivamente y las áreas transversales de Sarapullo, Toachi y la Galería de Interconexión se denominan AS, AT, AG. El área de la entrada Toachi, tiene una sección de 0,175 m x 0,275 m, el área de la entrada Sarapullo tiene una sección de 0,19 m de diámetro, el área de la salida de la galería tiene una sección de 0,175 m x 0,275 m.

**FIGURA 4.9:** Esquema de la estructura de unión



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

I.E. Idelchik (1996), también propone ábacos para obtener los coeficientes de pérdida en los dos ramales de la estructura de unión, estos ábacos se encuentran en función de la relación de caudales y de las relaciones de áreas de las secciones transversales de los conductos que componen la estructura de unión. En la **Tabla 4.5** se muestran los valores de los coeficientes de pérdida  $k_{5G}$  que corresponde al coeficiente de pérdida local Sarapullo – Galería, en función de la relación del caudal Toachi  $Q_T$  y el caudal de la galería  $Q_G, Q_T/Q_G$ , y en la **Tabla 4.6**, los valores de los coeficientes de pérdida  $k_{7G}$ , que corresponde al coeficiente de pérdida local Toachi

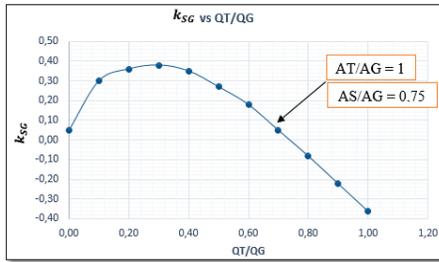
– Galería. En las FIGURAS 4.10 y 4.11 se presentan el coeficiente de pérdidas  $k_{SG}$ , (Sarapullo – Galería) y el coeficiente de pérdidas  $k_{TG}$ , (Toachi – Galería) en función de la relación de caudales  $Q_T/Q_G$ .

**Tabla 4.5:** Coeficiente de pérdidas  $k_{SG}$ , en función de la relación de caudales  $Q_T/Q_G$ , a partir de los ábacos de I.E.l'delchik.

QT/QG	$k_{SG}$
0,00	0,05
0,10	0,30
0,20	0,36
0,30	0,38
0,40	0,35
0,50	0,27
0,60	0,18
0,70	0,05
0,80	-0,08
0,90	-0,22
1,00	-0,36

Fuente: (l'delchick, 1966)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

**FIGURA 4.10:** Coeficiente de pérdidas  $k_{SG}$ , en función de la relación de caudales  $Q_T/Q_G$ , a partir de los ábacos de I.E.l'delchik.



Fuente: (l'delchick, 1966)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

La relación de áreas tanto del modelo numérico como del modelo físico son,  $AT/AG = 1$  y  $AS/AG = 0,60$ . Debido a que la literatura técnica no presenta estos valores exactos de relaciones de áreas se escogió la curva con relaciones de áreas  $AT/AG = 1$  y  $AS/AG = 0,75$ , ya que se aproxima a los valores en modelo y en prototipo.

La ecuación de ajuste de la curva para la FIGURA 4.10 en función de la relación de caudales es, y en función de las relaciones de áreas  $AT/AG = 1$  y  $AS/AG = 0,75$  es:  $-1,74 \left(\frac{QT}{QG}\right)^2 + 1,23 \frac{QT}{QG} + 0,14$  con  $R = 0,94$

**Tabla 4.6:** Coeficiente de pérdidas  $k_{TG}$ , en función de la relación de caudales  $Q_T/Q_G$ , y para una relación de áreas igual a 1 a partir de los ábacos de I.E.l'delchik.

QT/QG	$k_{TG}$
0,00	-1,00
0,10	-0,60
0,20	-0,30
0,30	-0,10
0,40	-0,04
0,50	0,13
0,60	0,21
0,70	0,29
0,80	0,36
0,90	0,42
1,00	0,50

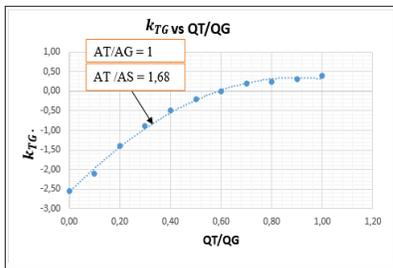
Fuente: (l'delchick, 1966)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

La ecuación de la curva para la FIGURA 4.11 en función de la relación de caudales y relación de áreas  $AT/AG = 1$  y  $AS/AG = 2,00$ , es:

$$-3,63 \left(\frac{QT}{QG}\right)^2 + 6,54 \frac{QT}{QG} - 2,59, \text{ con } R = 0,99.$$

La relación de áreas tanto del modelo numérico como del modelo físico son,  $AT/AG = 1$  y  $AT/AS = 1,68$ . Debido a que la literatura técnica no presenta estos valores exactos de relaciones de áreas se escogió la curva con relaciones de áreas  $AT/AG = 1$  y  $AS/AG = 2,00$ , ya que se aproxima a los valores en modelo y en prototipo.

**FIGURA 4.11:** Coeficiente de pérdidas  $k_{TG}$ , en función de la relación de caudales  $Q_T/Q_G$ , a partir de los ábacos de I.E.l'delchik.



Fuente: (l'delchick, 1966)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

En la Tabla 4.7 se observa los valores de los coeficientes de pérdida  $k_{27}$  en función de la relación  $Q_T/Q_G$ , y las relaciones de áreas  $AT/AG = 1$  y  $AS/AG = 0,60$ , para el modelo físico y el modelo numérico.

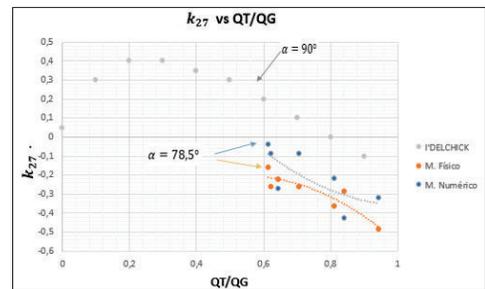
**Tabla 4.7:** Coeficiente de pérdidas  $k_{27}$ , en función de la relación de caudales  $Q_T/Q_G$ , a partir de los datos de la simulación numérica y modelo físico.

Escenario	QT/QG	Modelo Físico	Modelo Numérico
		K27	K27
Esc 1	0,61	-0,16	-0,04
Esc 4	0,62	-0,26	-0,09
Esc 3	0,65	-0,22	-0,27
Esc 7	0,71	-0,26	-0,09
Esc 2	0,73	-0,93	-0,81
Esc 6	0,81	-0,36	-0,22
Esc 5	0,84	-0,29	-0,43
Esc 8	0,94	-0,49	-0,32

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

En la FIGURA 4.12 se puede observar los valores de los ábacos de I.E.l'delchik y los valores de los coeficientes de pérdida local  $k_{27}$ , en función de la relación de caudales  $Q_T/Q_G$ , tanto para el modelo físico como para el modelo numérico, en la gráfica se observan valores a partir de una relación de caudales de 0.6 ya que en todos los escenarios ésta relación de caudal proveniente de la entrada Toachi y el caudal a la salida de la Galería oscila entre 0.6 a 1. Se puede observar que los valores obtenidos del modelo físico y del modelo numérico están por debajo de los valores experimentales del libro de l'delchik, se observa también que existe una variación entre los valores del modelo numérico y del modelo físico esto se debe a que para el cálculo de energías en el modelo físico el valor de carga piezométrica se lo realiza en un punto debido a que existe el dato de los puntos piezométricos, en cambio en el modelo numérico el valor de carga piezométrica para el cálculo de la energía se lo realiza en toda una sección no en un solo punto.

**FIGURA 4.12:** Coeficientes de pérdidas  $k_{27}$ , a partir de los datos de la simulación numérica, modelo físico y los ábacos de I.E.l'delchik.



Fuente: (ANSYS-CFX).  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Las ecuaciones que se presentan en el gráfico expresadas de acuerdo a la literatura técnica de l'delchik tanto para modelo físico como para modelo numérico son:

Handbook l'delchick:  $\alpha = 90^\circ, \frac{AT}{AG} = 1, \frac{AS}{AG} = 0,75 \quad -1,74 \left(\frac{QT}{QG}\right)^2 + 1,23 \frac{QT}{QG} + 0,14$   
 Modelo Físico:  $\alpha = 78,5^\circ, \frac{AT}{AG} = 1, \frac{AS}{AG} = 0,60 \quad -1,63 \left(\frac{QT}{QG}\right)^2 - 3,32 \frac{QT}{QG} + 1,34$   
 Modelo Numérico:  $\alpha = 78,5^\circ, \frac{AT}{AG} = 1, \frac{AS}{AG} = 0,60 \quad 1,63 \left(\frac{QT}{QG}\right)^2 + 1,77 \frac{QT}{QG} - 1,34$

De la misma manera se realiza la comparación de los resultados de los coeficientes de pérdida local (Toachi - Galería, "k<sub>47</sub>") entre los calculados con base en los ábacos de l'delchick, los resultados obtenidos de la simulación numérica y con los datos del modelo físico (Tabla 4.8) En esta tabla se puede observar los valores de los coeficientes de pérdida k<sub>47</sub> en función de la relación de caudales Q<sub>T</sub>/Q<sub>G</sub> y de las relaciones de áreas AT/AG = 1 y AT/AS = 1,68.

Se ha ordenado esta tabla de acuerdo a la relación de caudales Q<sub>T</sub>/Q<sub>G</sub> indistintamente de los escenarios a los que pertenezcan dichos valores, para poder tener una mejor comparación con los valores teóricos.

**Tabla 4.8:** Coeficiente de pérdidas k<sub>47</sub>, en función de la relación de caudales Q<sub>T</sub>/Q<sub>G</sub>, a partir de los datos de la simulación numérica y modelo físico.

Escenario	QT/QG	M. Físico	M. Numérico
		k47	k47
Esc 1	0,61	-0,03	-0,01
Esc 4	0,62	-0,09	-0,01
Esc 3	0,65	-0,03	0,22
Esc 7	0,71	0,01	0,13
Esc 2	0,73	0,17	0,06
Esc 6	0,81	0,09	0,13
Esc 5	0,84	0,17	0,20
Esc 8	0,94	0,17	0,23
Esc 9	0,96	0,14	0,50

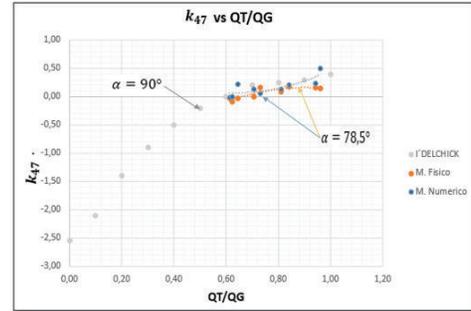
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

En la FIGURA 4.13 se puede observar los valores de los ábacos de I.E.Idelchik y los valores de los coeficientes de pérdida k<sub>47</sub>, en función de la relación de caudales

Q<sub>T</sub>/Q<sub>G</sub>, y en función de las relaciones de áreas AT/AG = 1 y AT/AS = 1,68, para modelo físico y numérico y relaciones de áreas AT/AG = 1 y AS/AG = 2,00, para la curva correspondiente a los datos de l'delchick.

Los valores de estos coeficientes de pérdidas obtenidos en la simulación numérica tienen valores positivos, salvo el caso del escenario 1 y 4 que presenta un valor negativo.

**FIGURA 4.13:** Coeficientes de pérdidas k<sub>47</sub>, a partir de los datos de la simulación numérica, modelo físico y los ábacos de I.E.Idelchik.



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Las ecuaciones que se presentan en el gráfico expresadas de acuerdo a la literatura técnica de l'delchick tanto para modelo físico como para modelo numérico son:

Handbook l'delchick:  $\alpha = 90^\circ, \frac{AT}{AG} = 1, \frac{AT}{AS} = 2,00 \quad -3,63 \left(\frac{QT}{QG}\right)^2 + 6,54 \frac{QT}{QG} - 2,59$   
 Modelo Físico:  $\alpha = 78,5^\circ, \frac{AT}{AG} = 1, \frac{AT}{AS} = 1,68 \quad -2,79 \left(\frac{QT}{QG}\right)^2 - 5,04 \frac{QT}{QG} + 2,11$   
 Modelo Numérico:  $\alpha = 78,5^\circ, \frac{AT}{AG} = 1, \frac{AT}{AS} = 1,68 \quad 2,85 \left(\frac{QT}{QG}\right)^2 - 3,55 \frac{QT}{QG} + 1,18$

**GRÁFICO DEL NÚMERO DE REYNOLDS VS EL COEFICIENTE DE PÉRDIDA LOCAL DEL MODELO FÍSICO Y EL OBTENIDO DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.**

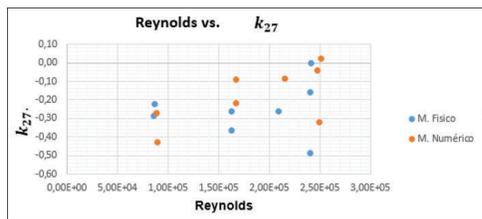
En la Tabla 4.9, se presentan los valores de números de Reynolds y coeficiente de pérdida local para los nueve escenarios descritos en el plan de pruebas

**Tabla 4.9:** Número de Reynolds y Coeficiente de Pérdida Local k<sub>27</sub>, para el modelo físico y modelo numérico.

Escenario	Re. M.F	K27	Re. M.N	K27
1	2,40E+05	-0,16	2,48E+05	-0,04
2	4,38E+04	-0,93	5,31E+04	-0,81
3	8,65E+04	-0,22	8,84E+04	-0,27
4	1,63E+05	-0,26	1,67E+05	-0,09
5	8,60E+04	-0,29	8,90E+04	-0,43
6	1,63E+05	-0,36	1,67E+05	-0,22
7	2,09E+05	-0,26	2,15E+05	-0,09
8	2,40E+05	-0,49	2,49E+05	-0,32
9	2,41E+05	0,00	2,51E+05	0,02

Fuente: (CIERHI - EPN, 2011), (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

**FIGURA 4.14:** Gráfica del número de Reynolds y el Coeficiente de Pérdida Local k<sub>27</sub>, para el modelo físico y modelo numérico.



Fuente: (CIERHI - EPN, 2011), (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

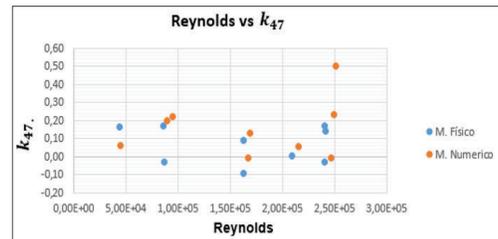
En la FIGURA 4.14 se indica la gráfica del número de Reynolds vs el coeficiente de pérdida local k<sub>27</sub>, para los nueve escenarios, se observa que los valores del coeficiente de pérdida tanto para modelo numérico como para el modelo físico oscilan entre 0 a -0,50.

**Tabla 4.10:** Número de Reynolds y el Coeficiente de Pérdida Local k<sub>47</sub> para el modelo físico y modelo numérico.

Escenario	Re. M.F	k 47	Re. M.N	k 47
1	2,40E+05	-0,03	2,47E+05	-0,01
2	4,38E+04	0,17	4,48E+04	0,06
3	8,65E+04	-0,03	9,43E+04	0,22
4	1,63E+05	-0,09	1,67E+05	-0,01
5	8,60E+04	0,17	8,90E+04	0,20
6	1,63E+05	0,09	1,69E+05	0,13
7	2,09E+05	0,01	2,15E+05	0,05
8	2,40E+05	0,17	2,49E+05	0,23
9	2,41E+05	0,14	2,51E+05	0,50

Fuente: (CIERHI - EPN, 2011), (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

**FIGURA 4.15:** Gráfica del número de Reynolds y el Coeficiente de Pérdida Local k<sub>47</sub>, para el modelo físico y modelo numérico.



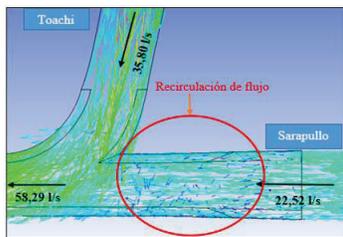
Fuente: (CIERHI - EPN, 2011), (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

En la FIGURA 4.15 se indica la gráfica del número de Reynolds vs el coeficiente de pérdida local  $k_{27}$ , para los nueve escenarios, se observa que los valores del coeficiente de pérdida tanto para modelo numérico como para el modelo físico oscilan entre -0,10 a 0,50 para todo el rango de caudales de operación.

**4.3 PATRÓN DE FLUJO EN LA ESTRUCTURA DE INTERCONEXIÓN PARA LOS ESCENARIOS ANALIZADOS.**

Para indicar las zonas donde se podría presentar recirculación se generaron vectores velocidad en la zona de unión de los fluidos para cada uno de los escenarios, a continuación, se muestran los vectores velocidad del escenario 1, y 2, los vectores velocidad para los demás escenarios se encuentran en el Anexo 4. En la FIGURA 4.16 se muestran los vectores velocidad en una gráfica en planta del escenario 1, en el cual ingresa 35,80 l/s por la Bocatoma Toachi, 22,52 l/s por la entrada de Sarapullo y 58,29 l/s por la salida de la Galería de Interconexión que corresponden a caudales en modelo. Se puede apreciar en la zona marcada con un círculo que los vectores velocidad de color azul provocan una zona de recirculación del flujo, ya que se puede ver que hay vectores velocidad de color azul pequeños que tienen dirección hacia el tramo Sarapullo y se regresan formando así un reflujo.

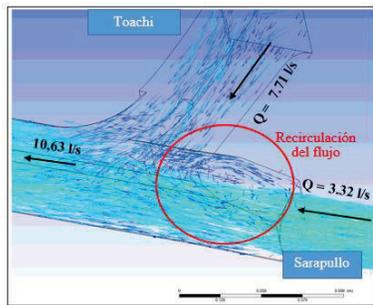
FIGURA 4.16: Vectores velocidad para el escenario 1. Vista en planta.



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Toachi. Los gráficos restantes de los demás escenarios se presentan en el Anexo 4.

FIGURA 4.18: Zonas de separación y/o reflujo. Escenario 2.



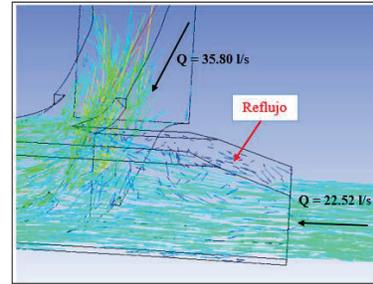
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

**4.4 VISUALIZACIÓN DEL FLUJO.**

A continuación, se comparan la visualización del flujo tanto para el modelo físico como para la modelación numérica de los nueve escenarios seleccionados. Para tener una mejor comparación entre las gráficas del modelo numérico y el modelo físico, se pintaron las líneas de corriente con un color similar al utilizado en las pruebas del modelo físico, por lo que se puede observar que el flujo se comporta de manera similar en los dos modelos. En la FIGURA 4.19, se indica el escenario 1, tanto para el modelo físico como para el modelo numérico. En esta figura se observa los valores de caudal en modelo expresados en l/s y los caudales en prototipo expresados en m³/s, en esta gráfica se indica de color magenta el flujo proveniente de la entrada Toachi, para tener una visualización similar en los dos modelos, se han colocado las líneas de corriente provenientes de la entrada Toachi en el modelo numérico de color magenta, por lo que se observa una similitud entre los flujos de los dos modelos.

En la FIGURA 4.17, se indica el escenario 1 en una vista frontal donde se pueden observar los mismos vectores velocidad que en la gráfica anterior pero desde otra perspectiva, de esta manera se puede visualizar que los vectores velocidad de color azul producen un tipo remolino en la parte superior de la estructura de unión. Esto ocurre debido a que en la zona de unión se produce un choque entre los dos flujos y al tener en el tramo Toachi un caudal mayor que en el tramo de Sarapullo, el flujo del tramo Sarapullo tiende a formar esos remolinos produciéndose un reflujo en la zona superior. Los valores de caudal que se observan en la gráfica son caudales modelo.

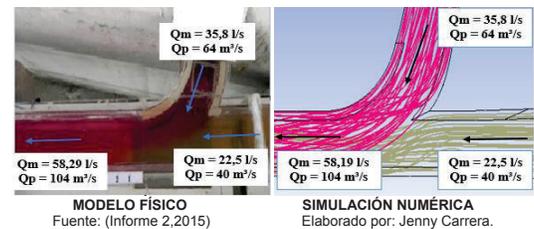
FIGURA 4.17: Vectores velocidad para el escenario 1. Vista frontal.



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

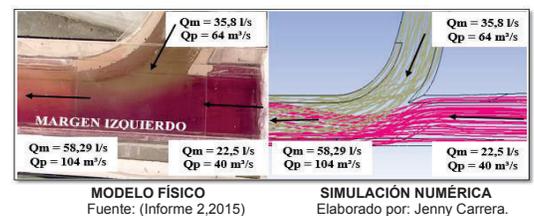
En la FIGURA 4.18, se indica los vectores velocidad del escenario 2, donde el caudal que ingresa por Sarapullo es de 3,32 l/s siendo éste un caudal modelo equivalente a 5,9 m³/s en caudal de prototipo y el caudal de ingreso de la Bocatoma Toachi es de 7,71 l/s correspondiente a 13,1 m³/s en caudal prototipo, se puede observar con mayor claridad el fenómeno de reflujo en la parte superior de la estructura, este remolino ocurre ya que al existir flujo desde Sarapullo, éste empuja hacia adelante impidiendo así el retroceso total del flujo proveniente de la Bocatoma

FIGURA 4.19: Entrada de flujo desde la bocatoma Toachi. ESCENARIO 1.



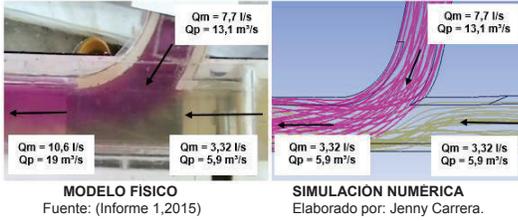
En la FIGURA 4.20, se muestra el mismo escenario 1, con los caudales en modelo y en prototipo con la particularidad de que en ésta grafica se observa el flujo proveniente de la entrada de Sarapullo pintada de color magenta tanto en el modelo físico como en el numérico, y se visualiza que el comportamiento del flujo es similar en los dos modelos. En esta figura se puede visualizar que cuando el flujo proveniente de la entrada Sarapullo ingresa a la estructura de unión tiende a pegarse a la margen izquierda de la misma, esto ocurre debido a que el flujo proveniente de la Bocatoma Toachi empuja al flujo proveniente de la entrada Sarapullo.

FIGURA 4.20: Entrada de flujo desde el túnel de descarga Sarapullo. ESCENARIO 1.



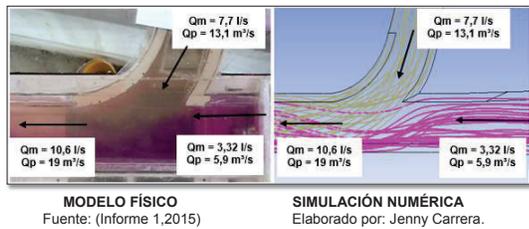
En la FIGURA 4.21, se muestra el escenario 2, donde el caudal que ingresa por Sarapullo es de 3,32 l/s y debido a la baja velocidad del flujo de aproximación este caudal es arrastrado por el flujo proveniente de la Bocatoma Toachi.

FIGURA 4.21: Entrada de flujo desde la bocatoma Toachi. ESCENARIO 2.



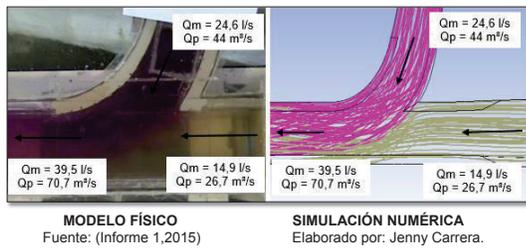
En la FIGURA 4.22, el flujo proveniente de la entrada Sarapullo es confinado por el flujo captado en la bocatoma del embalse Toachi, hacia la margen izquierda de la estructura de unión, ocupando así la menor proporción de toda la sección transversal alrededor de un 20% de la sección.

FIGURA 4.22: Entrada de flujo desde el túnel de descarga Sarapullo. ESCENARIO 2.



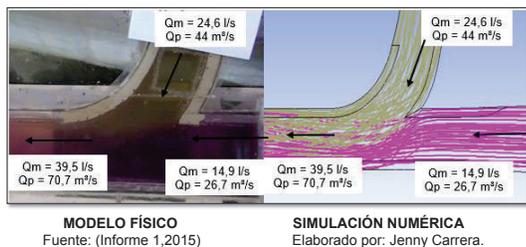
En la FIGURA 4.25, se indica el escenario 4 y se puede observar que los dos flujos ocupan el ancho de la sección transversal de manera simétrica en la estructura de unión, esto se debe a que los caudales de ingreso son cercanos.

FIGURA 4.25: Entrada de flujo desde la bocatoma Toachi. ESCENARIO 4.



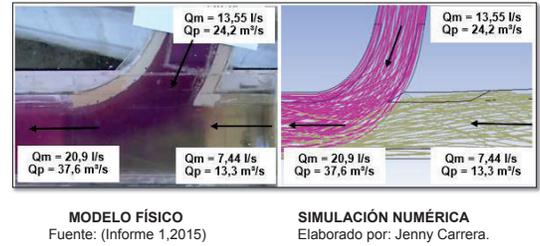
En la Figura 4.26, se muestra el escenario 4, en la sección de la galería de interconexión, el flujo aparece como una mezcla homogénea aguas abajo de la estructura de unión.

FIGURA 4.26: Entrada de flujo desde el túnel de descarga Sarapullo. ESCENARIO 4.



En la FIGURA 4.23, se observa el escenario 3, y se muestra que la mezcla de los flujos se realiza en la estructura de unión, esto quiere decir justo en la confluencia de los dos flujos

FIGURA 4.23: Entrada de flujo desde la bocatoma Toachi. ESCENARIO 3.



En la FIGURA 4.24 para el escenario 3, los flujos provenientes tanto de la entrada Sarapullo como de la Bocatoma del embalse Toachi se mezclan con facilidad ocupando el mismo espacio de la sección de la galería de interconexión, y la mezcla de los flujos se realiza inmediatamente aguas debajo de la estructura de unión.

FIGURA 4.24: Entrada de flujo desde el túnel de descarga Sarapullo. ESCENARIO 3.

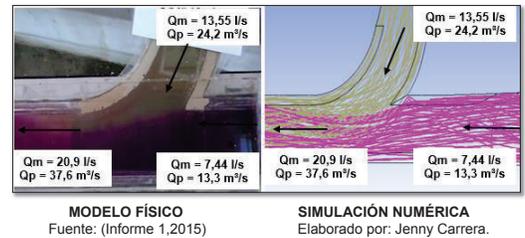
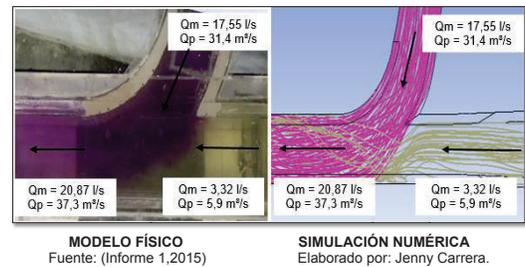
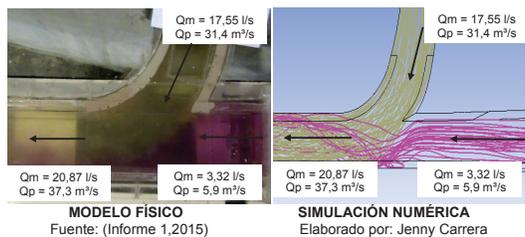


FIGURA 4.27: Entrada de flujo desde la bocatoma Toachi. ESCENARIO 5.



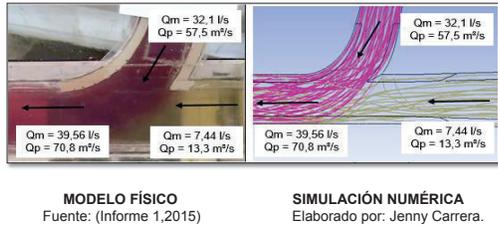
En la FIGURA 4.28, se observa el escenario 5, en la imagen del modelo físico se observa que el flujo proveniente de la entrada Sarapullo es llevado hacia la margen izquierda de la estructura de unión en el momento que se une con el flujo proveniente de la entrada Toachi, esto no se observa de igual manera en el modelo numérico ya que se observa que el flujo si es llevado hacia la margen izquierda de la estructura de unión pero que presenta un comportamiento más desordenado.

FIGURA 4.28: Entrada de flujo desde el túnel de descarga Sarapullo. ESCENARIO 5.



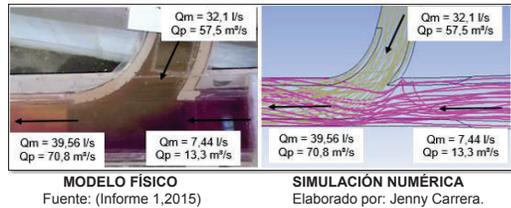
En la FIGURA 4.29 se muestra el escenario 6 y se observa que la mezcla de los flujos se logra un poco después de la estructura de unión, se observa también que el flujo proveniente de la Bocatoma Toachi ocupa la mayor parte de la sección transversal, esto ocurre ya que el caudal de esta entrada es cuatro veces mayor que el caudal proveniente de la entrada Sarapullo.

FIGURA 4.29: Entrada de flujo desde la bocatoma Toachi. ESCENARIO 6.



En la FIGURA 4.30 se muestra el escenario 6 donde la diferencia de caudales entre las dos entradas es grande debido a que por la entrada Sarapullo ingresa un caudal de apenas 7,44 l/s y por la entrada de la Bocatoma Toachi ingresa un caudal de 32,1 l/s por tanto en la imagen del modelo numérico se visualiza que el flujo de la Bocatoma Toachi ocupa la mayor parte de la sección transversal.

FIGURA 4.30: Entrada de flujo desde el túnel de descarga Sarapullo. ESCENARIO 6.



chocarse con el flujo proveniente de la Bocatoma Toachi, como se puede visualizar más claramente en el modelo numérico donde se observa que las líneas de corriente de Sarapullo tienen un comportamiento desordenado.

FIGURA 4.33: Entrada de flujo desde la bocatoma Toachi. ESCENARIO 8.

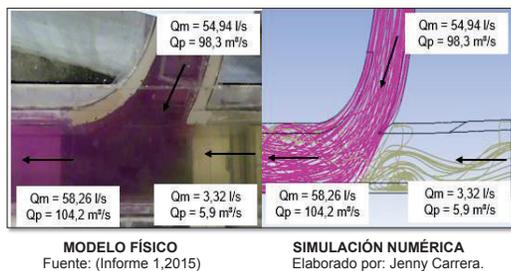
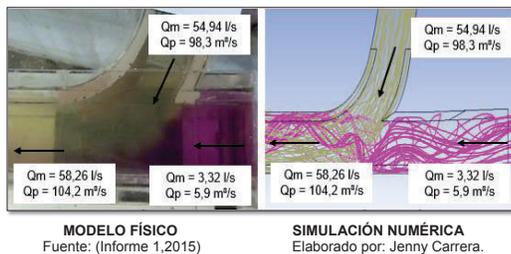
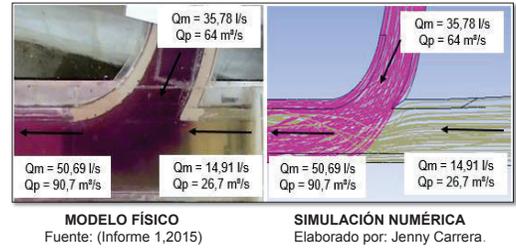


FIGURA 4.34: Entrada de flujo desde el túnel de descarga Sarapullo. ESCENARIO 8.



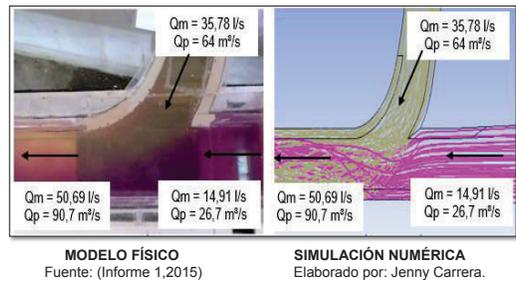
En la FIGURA 4.35, muestra el escenario 9, donde el flujo proveniente de la Bocatoma Toachi choca contra la pared de la galería de interconexión, el

FIGURA 4.31: Entrada de flujo desde la bocatoma Toachi. ESCENARIO 7.



En la FIGURA 4.32 se observa que el flujo proveniente de la Bocatoma del embalse Toachi para el escenario 7 ocupa la mayor parte de la sección de la galería de interconexión esto inmediatamente de la unión.

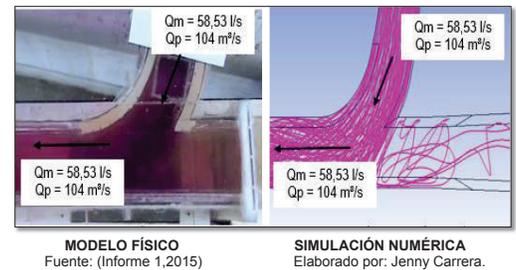
FIGURA 4.32: Entrada de flujo desde el túnel de descarga Sarapullo. ESCENARIO 7.



En la FIGURA 4.33 y en la FIGURA 4.34 se puede observar que para el escenario 8, el flujo proveniente de la entrada Sarapullo presenta una recirculación del flujo al

funcionamiento de la estructura de unión pasa a ser únicamente el paso de flujo a través de una curvatura al no existir flujo desde la entrada de Sarapullo.

FIGURA 4.35: Entrada de flujo desde la bocatoma Toachi. ESCENARIO 9.



4.5 CONCLUSIONES.

- En este capítulo se analizó la distribución de velocidades y de presiones bajo para los diferentes escenarios establecidos en el plan de pruebas. Una vez conocidas las características hidrodinámicas del flujo se determinó los coeficientes de pérdida local de energía para la estructura con su geometría particular. Para el escenario 1 correspondiente al caudal de diseño del modelo en prototipo el valor de coeficiente de pérdida local  $k_{27}$ , es -0,04 y el valor de coeficiente de pérdida local  $k_{47}$ , es -0,01. Los valores negativos indica que en la sección aguas debajo de la unión de flujos (sección 7) se tienen mayor Energía que en las secciones aguas arriba (sección 2 y 4).
- Los flujos en el interior de la estructura de interconexión fueron identificados visualmente para evaluar su comportamiento, en los escenarios 1, 2, 3, 4 los flujos provenientes de las dos entradas se mezclan en la misma proporción ocupando el mismo espacio de la sección de la galería de interconexión, en los escenarios 5, 6, 7, 8, se observa que el flujo proveniente de la Bocatoma

del embalse Toachi ocupa la mayor parte de la sección de la galería de interconexión debido a que el caudal que ingresa por Toachi es mayor.

- La visualización de las líneas de flujo en la simulación son similares a las fotografías del modelo físico, en el escenario se observa más claramente zonas de recirculación del flujo, debido a que el caudal que ingresa por la Bocatoma Toachi es de 54,94 l/s (caudal de modelo) y el caudal que ingresa por el tramo Sarapullo es de 3,32 l/s, (caudal de modelo), por tanto al ser el flujo de Sarapullo mucho menor al de la Bocatoma Toachi éste último ejerce resistencia al paso del caudal menor.

- Utilizando el modelo de turbulencia K-epsilon RNG se obtuvieron porcentajes de desviación menores al 8% y con el modelo de turbulencia Shear Stress Transport, los porcentajes de desviación son menores al 5%. Por lo tanto para la representación del fenómeno físico de la unión de flujos se escogió el modelo de turbulencia Shear Stress Transport ya que como se evidenció en este estudio y de acuerdo con la literatura técnica este modelo es adecuado para simular simultáneamente flujos que tienen números de Reynolds altos ( $Re > 10^5$ ) y el comportamiento del flujo en las paredes.
- El modelo numérico se calibró satisfactoriamente para el escenario 1, correspondiente a los caudales de diseño de las estructuras que conforman la galería de interconexión. Se obtuvieron resultados numéricos acordes con los resultados del modelo físico utilizando un malla tetraédrica, y aplicando el modelo de turbulencia SST. La desviación entre los resultados experimentales y del modelo numérico son menores al 7% en cuanto a los valores de presiones y caudales.

## CAPITULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

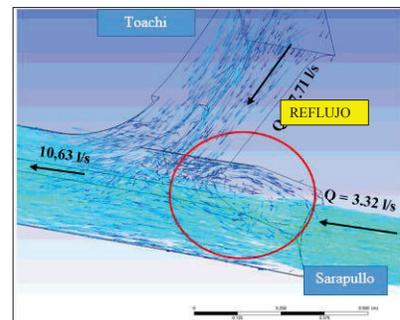
### 5.1 CONCLUSIONES.

#### CONCLUSIONES SOBRE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO.

- En la calibración del modelo se compara la utilización de dos tipos de mallas: una malla tetraédrica y una malla hexaédrica, el gasto computacional es similar en las dos mallas, para el malla hexaédrica en cuanto al chequeo de continuidad del flujo en el dominio computacional se tiene una desviación menor a 5%), y para el malla tetraédrica una desviación menor al 1%. Por lo tanto, se escogió el tipo de malla tetraédrica ya que presenta una menor desviación en la continuidad del flujo y también debido a que este tipo de malla no estructurada permite efectuar un refinado local sin afectar la distribución de celdas fuera de esta zona. Esto es importante debido que es necesario incrementar la precisión de los resultados en las regiones de fuerte gradiente de flujo.
- El estudio indica que se puede utilizar una malla no estructurada como método de discretización espacial en tuberías y en geometrías complejas como es el caso de la estructura de unión, para satisfacer las ecuaciones de conservación y obtener buenos resultados siempre y cuando, está malla esté dentro de los valores permisibles de calidad.
- El malla seleccionado en la estructura de interconexión presentan valores de los parámetros de calidad que se encuentran dentro del rango aceptable, Por ejemplo, el valor de ortogonalidad para esta malla es de 0,78 que se encuentra en el rango muy bueno, el valor de oblicuidad (skewness) es 0,25 que significa que está en el rango excelente, por lo tanto, dicha malla está dentro de los valores permisibles para una correcta simulación.

#### CONCLUSIONES SOBRE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN NUMERICA

- El análisis de las líneas de corriente en el dominio computacional analizado (estructura de unión) nos permitió localizar las zonas en donde se produce recirculaciones de flujo y también determinar para que caudales de operación se genera esta condición de reflujo. Los coeficientes de pérdidas local de energía en la estructura de unión para algunos escenarios son negativos. Este resultado se puede explicar observando efectivamente que para ciertos caudales de operación existe un reflujo hacia aguas arriba de la estructura de unión.



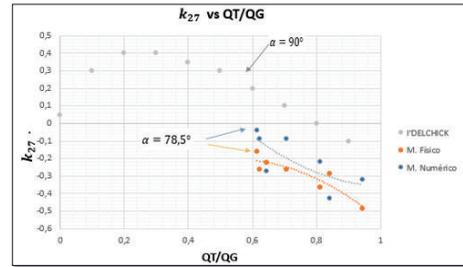
- En resumen, los resultados obtenidos del modelo numérico sobre la determinación de los coeficientes de pérdida local en la estructura de unión  $K_{27}$  (Sarapullo galería) y  $K_{47}$  (Toachi –Galería) se presentan en el siguiente cuadro.

RESULTADOS MODELO NUMÉRICO COEFICIENTES DE PERDIDA LOCAL. UNIÓN DE FLUJO					
UBICACIÓN	ESCENARIO	Caudal (l/s) Modelo Numérico	Caudal %	K27	K47
SARAPULLO	ESCENARIO 1	22.52	39	-0,04	-0,01
TOACHI		35.80	61		
GALERIA		58.29	100		
SARAPULLO	ESCENARIO 2	3.32	31	-0,09	-0,01
TOACHI		7.71	73		
GALERIA		10.63	100		
SARAPULLO	ESCENARIO 3	7.21	34	-0,27	0,22
TOACHI		13.55	65		
GALERIA		20.99	100		
SARAPULLO	ESCENARIO 4	16.30	41	-0,09	0,13
TOACHI		24.60	62		
GALERIA		39.51	100		
SARAPULLO	ESCENARIO 5	3.10	15	-0,81	0,06
TOACHI		17.55	84		
GALERIA		20.87	100		
SARAPULLO	ESCENARIO 6	6.91	17	-0,22	0,13
TOACHI		32.10	81		
GALERIA		39.56	100		
SARAPULLO	ESCENARIO 7	15.83	31	-0,43	0,20
TOACHI		35.78	71		
GALERIA		50.69	100		
SARAPULLO	ESCENARIO 8	3.49	6	-0,32	0,23
TOACHI		54.95	94		
GALERIA		58.26	100		
SARAPULLO	ESCENARIO 9	0.00	0		0,50
TOACHI		60.90	100		
GALERIA		60.90	100		

- Se observa que para los escenarios (1 y 2) los valores del coeficiente de pérdida local  $K_{47}$  son negativos y para el resto de escenarios los coeficientes son positivos. Para el escenario 1 y 2 los valores del coeficiente de pérdida local son semejantes ( $K_{47} = -0.01$ ), el caudal que es transportado por el túnel Toachi corresponde al 61 % y 73 % respectivamente con relación al caudal total que circula en la galería posterior a la unión del flujo. Para los

escenarios (3,4,5,6,7,8,9) los valores del coeficiente de pérdida local  $K_{47}$  son positivos y oscilan entre 0.13 a 0.50. Para el escenario 9 en donde solo se tiene el paso del flujo por el túnel Toachi el coeficiente de pérdida local  $K_{47} = 0.50$ , este valor indica que efectivamente existe una pérdida localizada debido al cambio de dirección del flujo que ingresa a la galería.

- Se observa que para los escenarios (1,2,3,4,5,6,7,8) los valores del coeficiente de pérdida local  $K_{27}$  son negativos para todo el rango de caudales de operación. El valor negativo más grande corresponde al escenario 1 y es igual a  $K_{27} = -0.04$ , para este escenario el caudal de Sarapullo corresponde al 39 % del caudal total que circula en la galería posterior a la unión del flujo. Mientras que el valor más pequeño corresponde al escenario 5 y es igual a  $K_{27} = -0.81$ , para este escenario el caudal de Sarapullo corresponde al 15 % del caudal total que circula en la galería posterior a la unión del flujo.
- Se comparó los valores de los ábacos de I.E. Idelchik y los valores de los coeficientes de pérdida  $k_{47}$ , en función de la relación de caudales  $Q_T/Q_G$ , y se observó que los valores de estos coeficientes de pérdidas obtenidos en la simulación numérica tienen valores positivos, salvo el caso del escenario 1 y 4 que presenta un valor negativo.



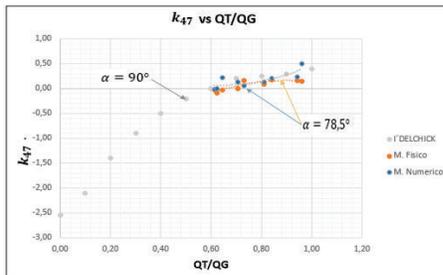
Fuente: (ANSYS-CFX).  
Elaborado por: Jenny Carrera.

- Las ecuaciones que se presentan en el gráfico expresadas de acuerdo a la literatura técnica de I'delchik tanto para modelo físico como para modelo numérico son:

Handbook I'delchick:  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\frac{AT}{AG} = 1, \frac{AS}{AG} = 0,75$   $-1,74 \left(\frac{QT}{QG}\right)^2 + 1,23 \frac{QT}{QG} + 0,14$

Modelo Físico:  $\alpha = 78,5^\circ$ ,  $\frac{AT}{AG} = 1, \frac{AS}{AG} = 0,60$   $-1,63 \left(\frac{QT}{QG}\right)^2 - 3,32 \frac{QT}{QG} + 1,34$

Modelo Numérico:  $\alpha = 78,5^\circ$ ,  $\frac{AT}{AG} = 1, \frac{AS}{AG} = 0,60$   $1,63 \left(\frac{QT}{QG}\right)^2 + 1,77 \frac{QT}{QG} - 1,34$



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

- Las ecuaciones que se presentan en el gráfico expresadas de acuerdo a la literatura técnica de I'delchik tanto para modelo físico como para modelo numérico son:

Handbook I'delchick:  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\frac{AT}{AG} = 1, \frac{AS}{AS} = 2,00$   $-3,63 \left(\frac{QT}{QG}\right)^2 + 6,54 \frac{QT}{QG} - 2,59$

Modelo Físico:  $\alpha = 78,5^\circ$ ,  $\frac{AT}{AG} = 1, \frac{AS}{AS} = 1,68$   $-2,79 \left(\frac{QT}{QG}\right)^2 - 5,04 \frac{QT}{QG} - 2,11$

Modelo Numérico:  $\alpha = 78,5^\circ$ ,  $\frac{AT}{AG} = 1, \frac{AS}{AS} = 1,68$   $2,85 \left(\frac{QT}{QG}\right)^2 - 3,55 \frac{QT}{QG} + 1,18$

- Los resultados obtenidos se encuentran por debajo de los resultados calculados con I'delchick, esto puede deberse a que los resultados de la literatura técnica fueron realizados para un ángulo de  $90^\circ$  por el contrario para el caso de los modelos físico y numérico los resultados fueron

calculados para un ángulo de  $78,5^\circ$ , por tanto, los resultados varían como se muestra en la gráfica anterior.

- Hay que recalcar que para el cálculo del coeficiente de pérdidas se compara por separado cada una de las entradas con la salida, en la salida tenemos el aporte de caudal de la entrada que no se está considerando al inicio, es decir para el coeficiente de pérdida  $K_{27}$  en el punto 2 se considera el flujo de Sarapullo, y en el punto 7 se considera el flujo de Sarapullo y el flujo proveniente de Toachi.
- Cuando tenemos una confluencia y uno de los ramales tiene un caudal pequeño en relación al otro ramal, la pérdida local por la confluencia es menor que la pérdida por fricción en ese tramo.
- El aporte de esta investigación en modelo numérico es que se obtienen los valores que nos permiten el cálculo de los coeficientes de pérdida para esta estructura especial de confluencia de una geometría diferente.

**5.2 RECOMENDACIONES.**

- Se recomienda que se continúe con el estudio de los coeficientes de pérdida local en estructuras de unión de geometrías complejas, ya que en la literatura técnica no se encuentran rangos de valores para diferentes geometrías con diferentes ángulos de unión. Este trabajo fue realizado para un ángulo de unión de  $78,5^\circ$ .
- El cálculo de estos coeficientes de pérdida local fueron obtenidos adoptando las definiciones del libro Handbook I'delchik, por lo que para la utilización de los mismos se debe tener una referencia de las condiciones y parámetros que este autor utiliza en cuanto a la relación de áreas, relación de caudales, ángulo de unión de flujos y demás parámetros necesarios para el cálculo de estos coeficientes.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

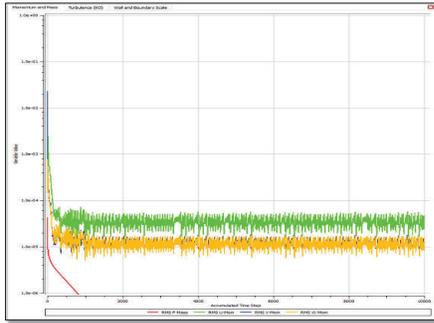
- Anslys - Help. (2016). Ansys - Help Support.
- Aulestia, C. (2017). Modelación numérica en tres dimensiones de flujo en las compuertas de la captación del proyecto Toachi - Pilatón aplicando dinámica de fluidos computacional (CFD).
- Berrones, J., & Quilligana, O. (Febrero de 2017). Simulación Numérica de una Rápida con fondo rugoso en el paquete computacional OpenFOAM. Quito.
- Casas, J., & Cárdenas, J. (2017). Diseño de una red hidráulica, automatizada para la optimización del lavado de filtros de la planta de tratamiento de Agua Potable de Guasca. Colombia.
- Castro, M. (2009). Teoría de modelos hidráulicos. *Apuntes de Clase, Postrado en Recursos Hidricos*.
- Cengel, Y., & Cimbala, J. (2006). Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones. Mexico: Mc Graw Hill.
- CIERHI - EPN. (2011). Estudio en Modelo Hidráulico, Escala 1:20 De la estructura de Unión Sarapullo - Toachi. *Informe Técnico*. Quito, Ecuador.
- CONAGUA. (2015). *Manual de Agua Potable alcantarillado y Saneamiento*. México.
- Daily, J. (2005). Dinámica de Fluidos. Editorial F. Trillas, S.A.
- Domingo, A. (2011). *Apuntes de mecánica de fluidos*. España: CC-BY S.A.
- Fernández, J. (2012). Técnica Numéricas en Ingeniería de Fluidos.
- Gallegos, A. (2009). Mecánica de Fluidos.
- Gherardelli, C. (2008). Mecánica de Fluidos, Análisis Diferencial.
- Giles, R., & Evett, J. (1996). Mecánica de los Fluidos e Hidráulica. Madrid, España.
- Giraldo, A. (Octubre de 2017). Simulación mediante Dinámica de Fluidos Computacional CFD de un Intercambiador de Flujo Cruzado. España.
- Gómez, R. (2007). Una estructura de datos basada en Aristas para la resolución de las ecuaciones de Navier Stokes.
- Gonzalez, J., & Castellano, G. (2014). *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. España: Club Universitario.
- Guerra, A. (Octubre de 2014). Cinemática de Fluidos. Santa de Coro.
- Gutiérrez, R. (2012). *Los modelos físicos a escala reducida y la simulación de manobras de buques. Herramientas para el diseño portuario*.
- Hidrotopi E.P. (2011). Descripción del Proyecto. Sarapullo - Alluriquin.
- I' delchick, I. (1966). *Handbook of Hydraulic Resistance* (Vol. 4). Leningrad, Moscú: D.Grunaer, P.E and IPSFtaff.
- Illan, V. (2013). Dinámica de fluidos.
- Lluguay Duchi, K. Á. (2016). Desarrollar un modelo CFD para el análisis del comportamiento del fluido en tuberías del banco de pérdidas de turbomaquinaria hidráulica y laboratorio. Riobamba, Riobamba, Ecuador.
- Lluguay, K. (2016). Desarrollar un modelo CFD para el análisis del comportamiento del fluido en tuberías del banco de pérdidas de Turbomaquinaria Hidráulica Y laboratorio.
- Lozano, A. (12 de Octubre de 2013). Notas CFD.
- Maldonado, & Pallares. (2015). *Análisis de modelo hidráulico de la estructura de interconexión de las centrales Sarapullo y Alluriquin*. Quito.
- Martínez, M. (2018). Estudio y Optimización de una aeronave con fuselaje de ala fija, aplicado a vehículos aéreos no tripulados en la región andina mediante simulación numérica de dinámica de fluidos computacional.
- Mendoza, J., & Mejía, K. (2017). Banco de pérdidas de carga en tuberías. Perú.
- Monge, C. (2017). *Modelo Numérico de un canal de fuerte pendiente con rugosidad variable aplicando el software ANSYS CFX, y comparación con los resultados obtenidos en el paquete computacional Open Foam*. Quito.
- Mott, R. (2006). *Mecánica de Fluidos*. México: Pearson Education S.A.
- Ortega, P. (25 de septiembre de 2015). Simulación Numérica de Una Estructura Separadora de Caudales con metodología CFD, aplicando el paquete computacional ANSYS-CFX. Quito, Pichincha.
- Pachacama, V. (2015). Dinámica de Fluidos Computacional. Salcedo, Ecuador.
- Pérez, S., & Renedo, C. (2012). Mecánica de Fluidos y Maquinarias Hidráulicas. Cantabria.
- pfc. (2004). Dinámica de Fluidos computacional. CFD.
- Pimienta, N. (4 de Octubre de 2014). *Mecánica de Fluidos*. Obtenido de <http://mecanicadefluidosuniguajira2014.blogspot.com/2014/10/clasificacion-de-flujos-de-fluidos.html>.

- Rocha, A. (2015). *Hidráulica de Tuberías y Canales*.
- Rojas, H. (2004). *Manual de Mecánica de fluidos II*.
- Sámano, D., & Mihir, S. (2009). Mecánica de Fluidos. Cuernavaca, México.
- Sotelo, A. (1982). *Hidráulica General*. México: LIMUSA S.A.
- Streeter, V. (2000). Mecánica de Fluidos. Santa Fé de Bogotá, Colombia: Graw - Hill Interamericana. S.A. .
- Torres, J. (2011). *Lección 678. Estática de Fluidos*. Obtenido de <https://www.ugr.es/~jtorres/t6.pdf>.
- Zenit, J. R. (Enero de 2017). Apuntes de Mecánica de Fluidos. México.

ANEXO 1.

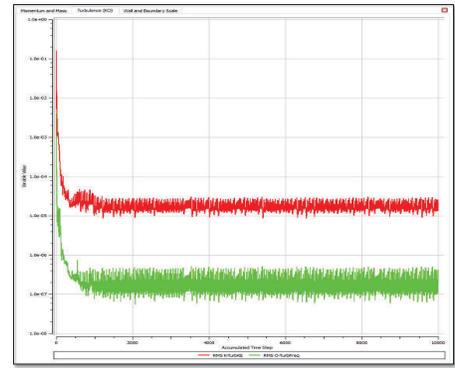
GRÁFICAS DE CONVERGENCIA.

ANEXO 1. 1: Gráficas de convergencia. Escenario 2.



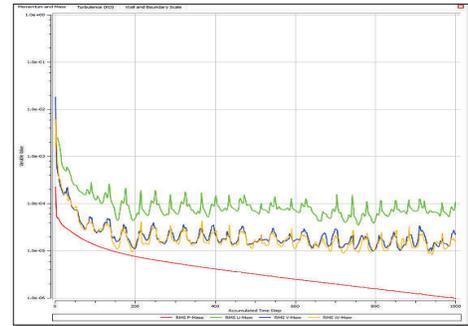
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

ANEXO 1. 2: Gráficas de convergencia de la energía cinética turbulenta y disipación turbulenta. Escenario 2.



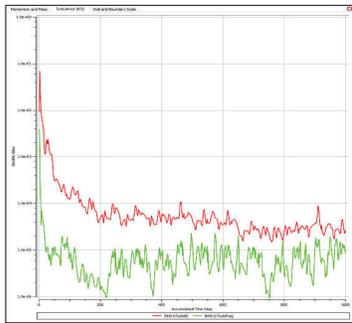
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

ANEXO 1. 3: Gráficas de convergencia. Escenario 3.



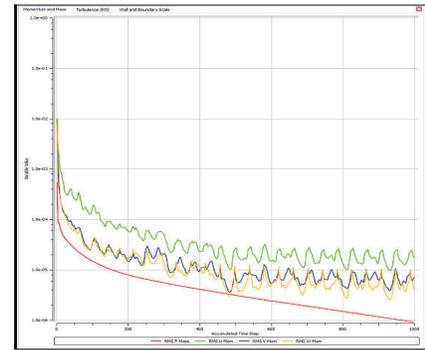
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

ANEXO 1. 4: Gráficas de convergencia de la energía cinética turbulenta y disipación turbulenta. Escenario 3.



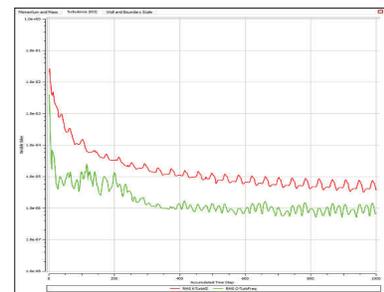
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

ANEXO 1. 5: Gráficas de convergencia. Escenario 4.



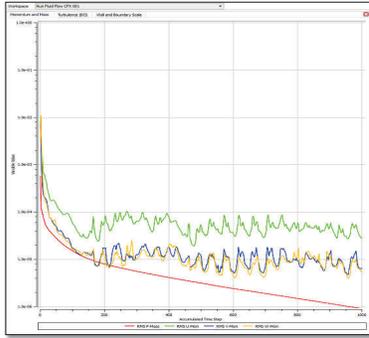
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

ANEXO 1. 6: Gráficas de convergencia de la energía cinética turbulenta y disipación turbulenta. Escenario 4.



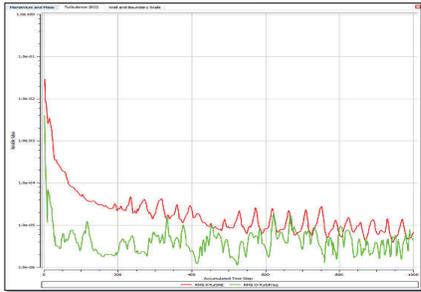
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

ANEXO 1. 7: Gráficas de convergencia. Escenario 6.



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

ANEXO 1. 8: Gráficas de convergencia de la energía cinética turbulenta y disipación turbulenta. Escenario 6.

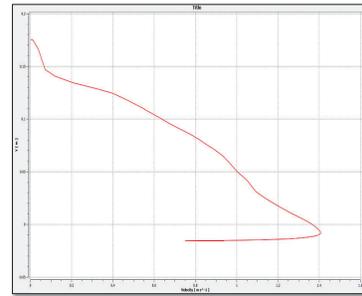


Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

ANEXO 2.

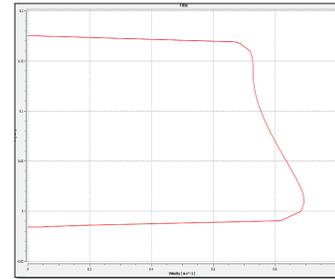
PERFILES DE VELOCIDAD.

ANEXO 2.1: Perfil de velocidad P1 Escenario 1.



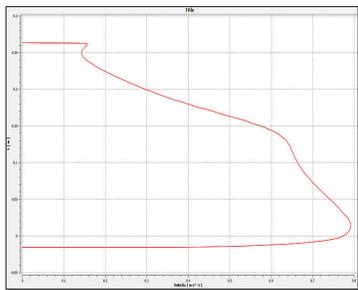
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

ANEXO 2.2: Perfil de velocidad P2. Escenario 1.



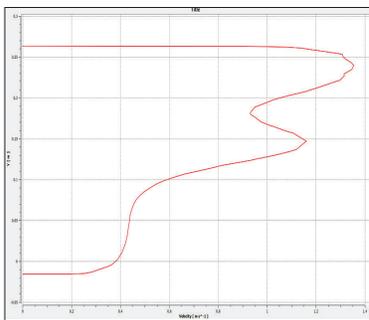
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

ANEXO 2.3: Perfil de velocidad P3, Escenario 1.



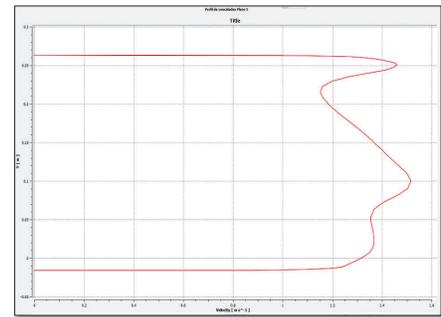
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

ANEXO 2.4: Perfil de velocidad P4, Escenario 1.



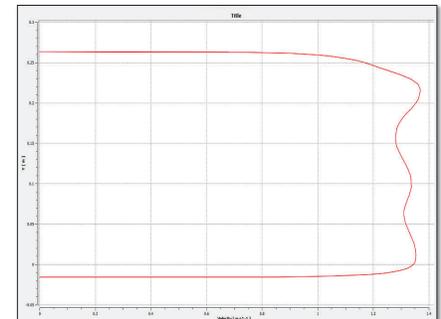
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

ANEXO 2.5: Perfil de velocidad P5, Escenario 1.



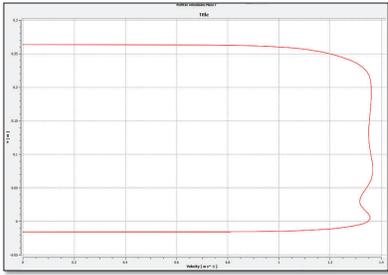
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

ANEXO 2.6: Perfil de velocidad P6, Escenario 1.



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

ANEXO 2.7: Perfil de velocidad P7, Escenario 1.

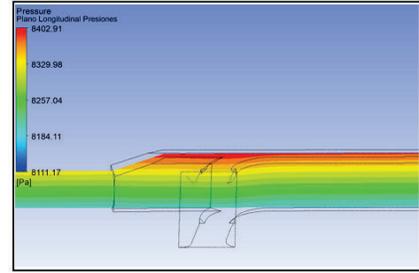


Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

ANEXO 3

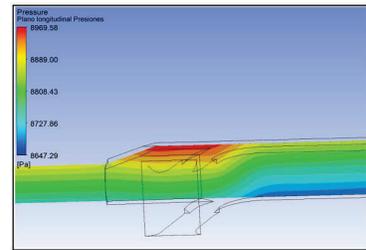
DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN EL EJE LONGITUDINAL.

Anexo 3.1: Distribución de presiones en el eje longitudinal de la Estructura de unión. Escenario 2.



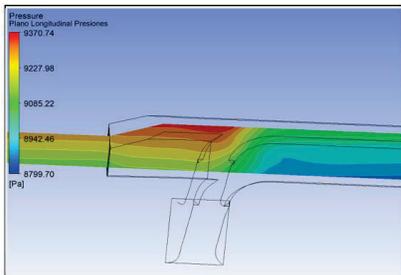
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Anexo 3.2: Distribución de presiones en el eje longitudinal de la Estructura de unión. Escenario 3.



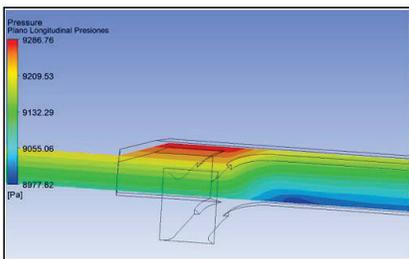
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Anexo 3.3: Distribución de presiones en el eje longitudinal de la Estructura de unión. Escenario 4.



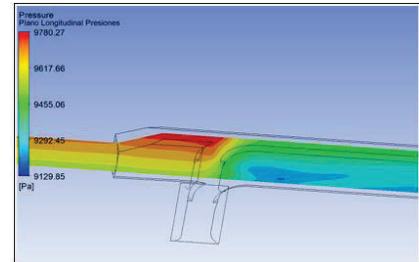
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Anexo 3.4: Distribución de presiones en el eje longitudinal de la Estructura de unión. Escenario 5.



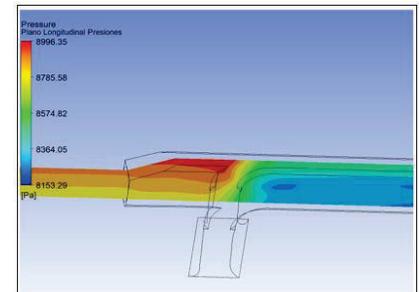
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Anexo 3.5: Distribución de presiones en el eje longitudinal de la Estructura de unión. Escenario 6.



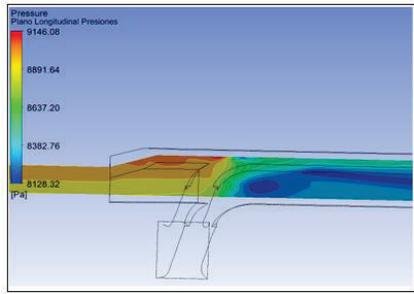
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Anexo 3.6: Distribución de presiones en el eje longitudinal de la Estructura de unión. Escenario 7.



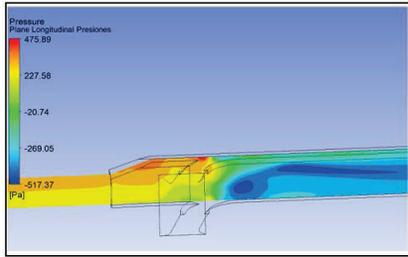
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Anexo 3.7: Distribución de presiones en el eje longitudinal de la Estructura de unión. Escenario 8.



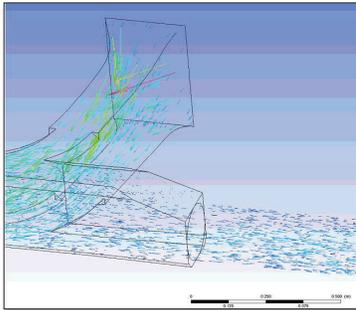
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Anexo 3.8: Distribución de presiones en el eje longitudinal de la Estructura de unión. Escenario 9.



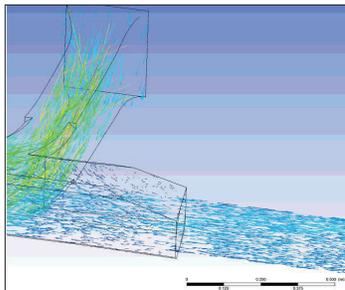
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Anexo 4.3 : Zonas de separación y/o reflujo. Escenario 5.



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Anexo 4.4: Zonas de separación y/o reflujo. Escenario 6.

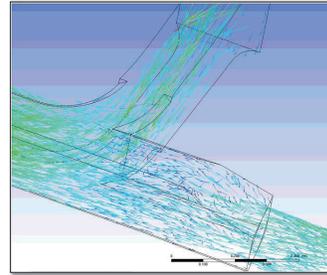


Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

ANEXO 4.

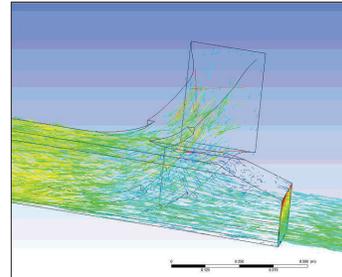
ZONAS DE SEPARACIÓN Y/O REFLUJO.

Anexo 4.1: Zonas de separación y/o reflujo. Escenario 3.



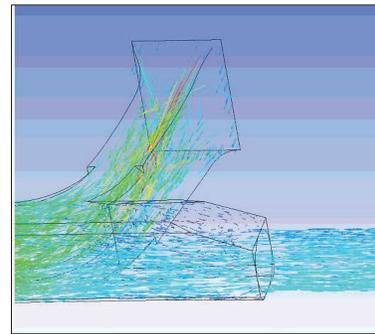
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Anexo 4.2 : Zonas de separación y/o reflujo. Escenario 4.



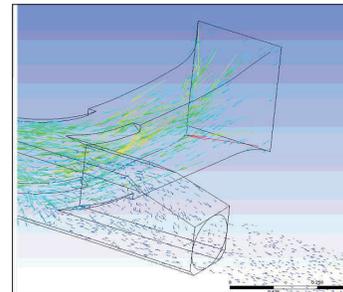
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Anexo 4.5: Zonas de separación y/o reflujo. Escenario 7



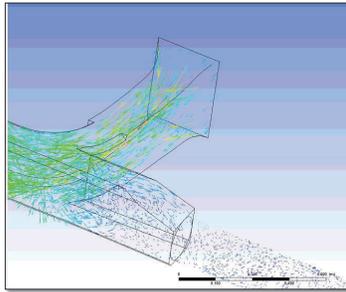
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Anexo 4.6: Zonas de separación y/o reflujo. Escenario 8



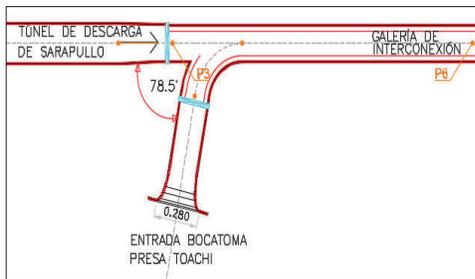
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Anexo 4.7: Zonas de separación y/o reflujos. Escenario 9.



Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

ANEXO 5. 3: Esquema de la ubicación del piezómetro 3 y el piezómetro 6.



Fuente: (CIERHI - EPN, 2011)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Anexo 5. 4: Valores del coeficiente de pérdida local ( $k_{36}$ ).

Fase	Escenario	$p3$	$V3^2/2g$	$p6$	$V6^2/2g$	$\lambda$	$hf$	$E3$	$E6$	$k_{36}$
2	1	0,891	0,025	0,818	0,081	0,015	0,011	0,92	0,90	0,08
1	2	0,837	0,001	0,836	0,003	0,022	0,001	0,84	0,84	-0,39
2	3	0,895	0,003	0,884	0,010	0,019	0,002	0,90	0,89	0,18
2	4	0,935	0,012	0,902	0,037	0,016	0,006	0,95	0,94	0,06
1	5	0,928	0,004	0,918	0,011	0,019	0,002	0,93	0,93	0,11
2	6	0,977	0,014	0,942	0,038	0,016	0,006	0,99	0,98	0,12
2	7	0,897	0,020	0,840	0,062	0,016	0,009	0,92	0,90	0,11
2	8	0,903	0,034	0,840	0,083	0,015	0,011	0,94	0,92	0,02
1	9	1,101	0,028	1,042	0,085	0,015	0,012	1,13	1,13	-0,12

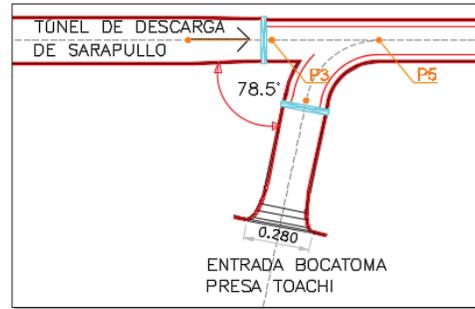
Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Los valores del coeficiente de pérdida  $k_{35}$  y  $k_{36}$  que se indican en la **Tabla 4.14** y **4.15** muestran valores positivos, salvo en el escenario 2 y el escenario 9, donde los valores son negativos esto se debe a que al restar la energía en el punto 6 y las pérdidas a la energía en el punto 3, resulta un valor negativo.

ANEXO 5.

COEFICIENTE DE PÉRDIDA LOCAL

Anexo 5.1: Esquema de la ubicación del piezómetro 3 y el piezómetro 5.



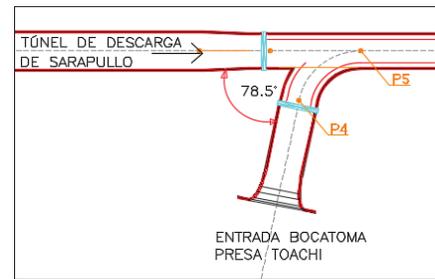
Fuente: (CIERHI - EPN, 2011)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Anexo 5.2 : Valores del coeficiente de pérdida local ( $k_{35}$ ).

Fase	Escenario	$p3$	$V3^2/2g$	$p5$	$V5^2/2g$	$\lambda$	$hf$	$E3$	$E5$	$k_{35}$
2	1	0,891	0,025	0,829	0,083	0,015	0,003	0,92	0,91	0,03
1	2	0,837	0,001	0,836	0,003	0,022	0,000	0,84	0,84	-0,26
2	3	0,895	0,003	0,886	0,011	0,019	0,000	0,90	0,90	0,07
2	4	0,935	0,012	0,907	0,038	0,016	0,001	0,95	0,95	0,004
1	5	0,928	0,004	0,920	0,011	0,018	0,000	0,93	0,93	0,002
2	6	0,977	0,014	0,947	0,040	0,016	0,001	0,99	0,99	0,07
2	7	0,897	0,020	0,848	0,064	0,016	0,002	0,92	0,91	0,04
2	8	0,903	0,034	0,838	0,092	0,015	0,003	0,94	0,93	0,04
1	9	1,101	0,028	1,025	0,100	0,015	0,003	1,13	1,12	0,01

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

ANEXO 5. 5: Esquema de la ubicación del piezómetro 4 y el piezómetro 5.



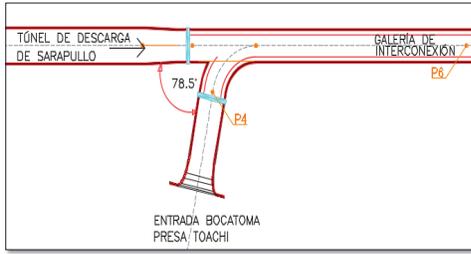
Fuente: (CIERHI - EPN, 2011)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Anexo 5. 6 : Valores del coeficiente de pérdida local ( $k_{45}$ ).

Fase	Escenario	$p4$	$V4^2/2g$	$p5$	$V5^2/2g$	$\lambda$	$hf$	$E4$	$E5$	$k_{45}$
2	1	0,875	0,032	0,829	0,083	0,015	0,003	0,91	0,91	-0,08
1	2	0,838	0,000	0,836	0,003	0,022	0,000	0,84	0,84	-0,37
2	3	0,892	0,005	0,886	0,011	0,019	0,000	0,90	0,90	-0,08
2	4	0,929	0,015	0,907	0,038	0,016	0,001	0,94	0,95	-0,08
1	5	0,924	0,008	0,920	0,011	0,018	0,000	0,93	0,93	0,00
2	6	0,963	0,026	0,947	0,040	0,016	0,001	0,99	0,99	0,02
2	7	0,879	0,032	0,848	0,064	0,016	0,002	0,91	0,91	-0,06
2	8	0,871	0,075	0,838	0,092	0,015	0,003	0,95	0,93	0,14
1	9	1,046	0,091	1,025	0,100	0,015	0,003	1,14	1,13	0,08

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

**ANEXO 5. 7: Esquema de la ubicación del piezómetro 4 y el piezómetro 6.**



Fuente: (CIERHI - EPN, 2011)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

**Anexo 5. 8: Valores del coeficiente de pérdida local ( $k_{46}$ ).**

Fase	Escenario	$p4$	$V4^2/2g$	$p6$	$V6^2/2g$	$\lambda$	$hf$	$E4$	$E6$	$k46$
2	1	0,875	0,032	0,818	0,081	0,015	0,011	0,91	0,90	-0,03
1	2	0,838	0,000	0,836	0,003	0,022	0,001	0,84	0,84	-0,39
2	3	0,892	0,005	0,884	0,010	0,019	0,002	0,90	0,89	0,02
2	4	0,929	0,015	0,902	0,037	0,016	0,005	0,94	0,94	-0,03
1	5	0,924	0,008	0,918	0,011	0,019	0,002	0,93	0,93	0,11
2	6	0,963	0,026	0,942	0,038	0,016	0,006	0,99	0,98	0,07
2	7	0,879	0,032	0,840	0,062	0,016	0,009	0,91	0,90	0,02
2	8	0,871	0,075	0,840	0,083	0,015	0,011	0,95	0,92	0,13
1	9	1,046	0,091	1,042	0,085	0,015	0,012	1,14	1,13	-0,03

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

**Anexo 5. 9: Valores del coeficiente de pérdida local ( $k_{15}$ ).**

Escenario	$p1/\gamma$	$V1^2/2g$	$p5/\gamma$	$V5^2/2g$	$\lambda$	$hf$	$E1$	$E5$	$k15$
1	0,886	0,033	0,829	0,083	0,015	0,017	0,92	0,91	-0,12
2	0,832	0,008	0,836	0,003	0,022	0,001	0,84	0,84	-0,10
3	0,894	0,004	0,886	0,011	0,019	0,003	0,90	0,90	-0,14
4	0,929	0,017	0,907	0,038	0,016	0,008	0,95	0,95	-0,20
5	0,926	0,001	0,920	0,011	0,018	0,003	0,93	0,93	-0,60
6	0,934	0,019	0,947	0,040	0,016	0,009	0,95	0,99	-1,04
7	0,883	0,019	0,848	0,064	0,016	0,013	0,90	0,91	-0,36
8	0,905	0,002	0,838	0,092	0,015	0,018	0,91	0,93	-0,45
9	0,020	0,001	-0,043	0,094	0,015	0,019	0,02	0,05	-0,53

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

**Anexo 5. 10: Valores del coeficiente de pérdida local ( $k_{16}$ ).**

Escenario	$p1$	$V1^2/2g$	$p6$	$V6^2/2g$	$\lambda$	$hf$	$E1$	$E6$	$k16$
1	0,886	0,033	0,818	0,081	0,015	0,025	0,92	0,90	-0,06
2	0,832	0,008	0,836	0,003	0,022	0,001	0,84	0,84	-0,11
3	0,894	0,004	0,884	0,010	0,019	0,004	0,90	0,89	-0,03
4	0,929	0,017	0,902	0,037	0,016	0,012	0,95	0,94	-0,14
5	0,926	0,001	0,918	0,011	0,019	0,004	0,93	0,93	-0,52
6	0,934	0,019	0,942	0,038	0,016	0,013	0,95	0,98	-1,04
7	0,883	0,019	0,840	0,062	0,016	0,019	0,90	0,90	-0,30
8	0,905	0,002	0,840	0,083	0,015	0,025	0,91	0,92	-0,51
9	0,020	0,001	-0,039	0,084	0,015	0,026	0,02	0,05	-0,59

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

**Anexo 5. 11: Valores del coeficiente de pérdida local ( $k_{17}$ ).**

Escenario	$p1$	$V1^2/2g$	$p7$	$V7^2/2g$	$\lambda$	$hf$	$E1$	$E7$	$k17$
1	0,886	0,033	0,810	0,080	0,015	0,016	0,92	0,89	0,15
2	0,832	0,008	0,836	0,003	0,022	0,001	0,84	0,84	0,12
3	0,894	0,004	0,883	0,010	0,019	0,003	0,90	0,89	0,21
4	0,929	0,017	0,899	0,037	0,016	0,008	0,95	0,94	0,07
5	0,926	0,001	0,917	0,010	0,019	0,003	0,93	0,93	-0,25
6	0,934	0,019	0,937	0,038	0,016	0,008	0,95	0,97	-0,79
7	0,883	0,019	0,832	0,061	0,016	0,013	0,90	0,89	-0,06
8	0,905	0,002	0,832	0,082	0,015	0,016	0,91	0,91	-0,28
9	0,020	0,001	-0,047	0,083	0,015	0,017	0,02	0,04	-0,39

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

**Anexo 5. 12: Valores del coeficiente de pérdida local ( $k_{27}$ ).**

Fase	Escenario	$p2$	$V2^2/2g$	$p7$	$V7^2/2g$	$hf$	$E2$	$E7$	$k27$
2	1	0,883	0,022	0,810	0,080	0,019	0,91	0,89	-0,05

1	2	0,891	0,002	0,836	0,003	0,001	0,89	0,84	20,52
2	3	0,894	0,003	0,883	0,010	0,003	0,90	0,89	-0,01
2	4	0,933	0,010	0,899	0,037	0,010	0,94	0,94	-0,08
1	5	0,892	0,000	0,917	0,010	0,003	0,89	0,93	-3,62
2	6	0,976	0,002	0,937	0,038	0,010	0,98	0,97	-0,16
2	7	0,894	0,010	0,832	0,061	0,015	0,90	0,89	-0,08
2	8	0,905	0,001	0,832	0,082	0,020	0,91	0,91	-0,34
1	9	0,837	0,001	-0,047	0,083	0,020	0,84	0,04	9,42

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

1	9	-0,013	0,085	-0,047	0,083	0,018	0,07	0,04	0,22
---	---	--------	-------	--------	-------	-------	------	------	------

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

De igual manera en los piezómetros 4 y 7 ubicados en un tramo de la Bocatoma Toachi, y en la Salida de la Galería los valores del coeficiente de pérdida  $k_{47}$  son en la mayoría de los escenarios positivos, en los escenarios 2 y 5 los valores de  $k_{47}$  siguen siendo negativos, esto puede deberse a que los caudales son menores en estos escenarios.

**Anexo 5. 13: Valores del coeficiente de pérdida local ( $k_{37}$ ).**

Fase	Escenario	$p3$	$V3^2/2g$	$p7$	$V7^2/2g$	$hf$	$E3$	$E7$	$k37$
2	1	0,891	0,025	0,810	0,080	0,017	0,92	0,89	0,11
1	2	0,837	0,001	0,836	0,003	0,001	0,84	0,84	-0,42
2	3	0,895	0,003	0,883	0,010	0,003	0,90	0,89	0,19
2	4	0,935	0,012	0,899	0,037	0,009	0,95	0,94	0,08
1	5	0,928	0,004	0,917	0,010	0,003	0,93	0,93	0,16
2	6	0,977	0,014	0,937	0,038	0,009	0,99	0,97	0,18
2	7	0,897	0,020	0,832	0,061	0,014	0,92	0,89	0,16
2	8	0,903	0,034	0,832	0,082	0,018	0,94	0,91	0,07
1	9	0,016	0,042	-0,047	0,083	0,018	0,06	0,04	0,05

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

Los valores de los coeficientes de pérdida local  $k_{37}$ , tomando en el piezómetro 3, ubicado en un tramo de Sarapullo y el piezómetro 7, ubicado en la sala de la galería, presentan valores positivos, indicando así que el flujo al pasar de la unión se estabiliza al llegar a la salida de la Galería.

**Anexo 5. 14: Valores del coeficiente de pérdida local ( $k_{47}$ ).**

Fase	Escenario	$p4$	$V4^2/2g$	$p7$	$V7^2/2g$	$hf$	$E4$	$E7$	$k47$
2	1	0,875	0,032	0,810	0,080	0,017	0,91	0,89	0,00
1	2	0,838	0,000	0,836	0,003	0,001	0,84	0,84	-0,42
2	3	0,892	0,005	0,883	0,010	0,003	0,90	0,89	0,03
2	4	0,929	0,015	0,899	0,037	0,009	0,94	0,94	-0,01
1	5	0,924	0,008	0,917	0,010	0,003	0,93	0,93	0,17
2	6	0,963	0,026	0,937	0,038	0,009	0,99	0,97	0,13
2	7	0,879	0,032	0,832	0,061	0,014	0,91	0,89	0,06
2	8	0,871	0,075	0,832	0,082	0,018	0,95	0,91	0,18

**Anexo 5. 15: Valores del coeficiente de pérdida local ( $k_{85}$ ).**

Fase	Escenario	$p8$	$V8^2/2g$	$p5$	$V5^2/2g$	$hf$	$E8$	$E5$	$k85$
2	1	0,879	0,036	0,829	0,083	0,006	0,92	0,91	-0,03
1	2	0,840	0,000	0,836	0,003	0,000	0,84	0,84	0,27
2	3	0,894	0,005	0,886	0,011	0,001	0,90	0,90	0,12
2	4	0,931	0,017	0,907	0,038	0,003	0,95	0,95	-0,01
1	5	0,926	0,008	0,920	0,011	0,001	0,93	0,93	0,25
2	6	0,967	0,028	0,947	0,040	0,003	0,99	0,99	0,13
2	7	0,883	0,035	0,848	0,064	0,004	0,92	0,91	0,01
2	8	0,879	0,081	0,838	0,092	0,006	0,96	0,93	0,25
1	9	-0,004	0,092	-0,043	0,094	0,006	0,09	0,05	0,31

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

**Anexo 5. 16: Valores del coeficiente de pérdida local ( $k_{86}$ ).**

Fase	Escenario	$p8$	$V8^2/2g$	$p6$	$V6^2/2g$	$hf$	$E8$	$E6$	$k86$
2	1	0,879	0,036	0,818	0,081	0,014	0,92	0,90	0,03
1	2	0,840	0,000	0,836	0,003	0,001	0,84	0,84	0,25
2	3	0,894	0,005	0,884	0,010	0,002	0,90	0,89	0,22
2	4	0,931	0,017	0,902	0,037	0,007	0,95	0,94	0,05
1	5	0,926	0,008	0,918	0,011	0,002	0,93	0,93	0,37
2	6	0,967	0,028	0,942	0,038	0,007	0,99	0,98	0,18
2	7	0,883	0,035	0,840	0,062	0,011	0,92	0,90	0,08
2	8	0,879	0,081	0,840	0,083	0,015	0,96	0,92	0,26
1	9	-0,004	0,092	-0,039	0,084	0,015	0,09	0,05	0,33

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera.

**Anexo 5. 17: Valores del coeficiente de pérdida local ( $k_{87}$ ).**

Fase	Escenario	$p8$	$v8^2/2g$	$p7$	$V7^2/2g$	$hf$	$E8$	$E7$	$k87$
2	1	0,879	0,036	0,810	0,080	0,020	0,92	0,89	0,05
1	2	0,840	0,000	0,836	0,003	0,001	0,84	0,84	0,22
2	3	0,894	0,005	0,883	0,010	0,003	0,90	0,89	0,24
2	4	0,931	0,017	0,899	0,037	0,010	0,95	0,94	0,06
1	5	0,926	0,008	0,917	0,010	0,003	0,93	0,93	0,43
2	6	0,967	0,028	0,937	0,038	0,010	0,99	0,97	0,25
2	7	0,883	0,035	0,832	0,061	0,016	0,92	0,89	0,13
2	8	0,879	0,081	0,832	0,082	0,021	0,96	0,91	0,31
1	9	-0,004	0,092	-0,047	0,083	0,021	0,09	0,04	0,36

Fuente: (ANSYS-CFX)  
Elaborado por: Jenny Carrera