

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UNA RÁPIDA CON FONDO RUGOSO
EN EL PAQUETE COMPUTACIONAL OpenFOAM**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
MENCION HIDRÁULICA**

JOSÉ ADOLFO BERRONES CUENCA

joseabc18@hotmail.com

OSCAR ROLANDO QUILLIGANA CHAMBA

oscar26cvl@gmail.com

DIRECTOR: ING. PATRICIO RUBÉN ORTEGA LARA MSc.

patricio.ortega@epn.edu.ec

CODIRECTOR: ING. FRANK ALEX PLÚA AGUIRRE MSc.

frank.plua@epn.edu.ec

Quito, Febrero 2017

DECLARACIÓN

Nosotros, José Adolfo Berrones Cuenca y Oscar Rolando Quilligana Chamba, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que hemos 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.

José Adolfo Berrones Cuenca

Oscar Rolando Quilligana Chamba

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por José Adolfo Berrones Cuenca y Oscar Rolando Quilligana Chamba, bajo nuestra supervisión.

Ing. Patricio Ortega Lara MSc.
DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Frank Plúa Aguirre MSc.
CODIRECTOR DEL
PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Las mayores satisfacciones de la vida se presentan al lograr los objetivos propuestos, aunque se hayan presentado dificultades en el caminar. Debemos sentirnos orgullosos de los resultados obtenidos, por el esfuerzo y dedicación brindada, al final, para nosotros será un gran triunfo.

Por ese triunfo, siento infinita gratitud con Dios por la fuerza de voluntad que me brindó, de igual manera con todas las personas que fueron parte de este proceso, por lo que elevo mi agradecimiento:

A mi madre, ejemplo de un ser perseverante, por enseñarme y demostrarme que a pesar de las adversidades cotidianas se puede salir adelante.

A mi hermano, ya que por seguir sus pasos de formación superior decidí educarme y formarme profesionalmente en esta prestigiosa institución.

A mi hermana y sobrinos, por el gran apoyo que me brindan.

A los Ingenieros Patricio Ortega, Frank Plúa y William Venegas, al Dr. Víctor Hugo Hidalgo, a la Ing. Patricia Haro.

A Oscar, por la dedicación y por la gran experiencia compartida en el desarrollo del proyecto.

A los profesores de la FICA por impartirnos sus conocimientos, a mis amigos de carrera, a mis amigos cercanos Hugo, Jaime, Jessy, Marcelita y Gaby.

José Berrones C.

DEDICATORIA

A mi madre, a mi hermano, a mi hermana y sobrinos, a quienes les quiero mucho.

A Hugo y familia, a quienes les estimo mucho por la grandeza de sus corazones y buena voluntad hacia mí.

A la Lcda. Marcela Herrera, por ser una buena influencia.

A mis grandes amigos del campo laboral, Arquitecto César e Ingeniero Carlos.

A mis grandes amigos de la vida: Jaime y familia, Jessy y Gaby.

A mis grandes amigos de facultad.

A mi familia, familia Cuenca.

José Berrones C.

AGRADECIMIENTO

A mi familia, en especial a mis Padres, Elena, José por el apoyo incondicional, por sus consejos, el esfuerzo realizado para sacarnos adelante y permitirme alcanzar este logro tan importante.

A mis hermanos Willan y Nathaly, a Jessica, mi sobrina Evoni y toda mi familia.

A los Ingenieros Patricio Ortega, Frank Plúa y William Venegas, Ingeniera Patricia Haro, al Doctor Víctor Hugo Hidalgo por el apoyo y por los conocimientos brindados para el desarrollo y culminación de este proyecto.

A José por el conocimiento compartido en el trascurso de realizar este trabajo.

A todos los profesores de la Facultad de Ingeniería Civil por la formación académica.

A los amigos y demás personas por el apoyo en la realización de este trabajo.

Oscar Rolando Quilligana Ch.

DEDICATORIA

A mis Padres José, Elena, a mis hermanos Willan y Nathaly, a mi abuelito Lorenzo por el enorme cariño brindado en vida, a Evoni, Jessica y toda la familia.

A mis tíos Olga, Segundo y prima Nely por el apoyo incondicional brindado a nuestra familia.

Oscar Rolando Quilligana Ch.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 GENERALIDADES DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA.	1
1.1.1 ANTECEDENTES DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD).....	1
1.1.2 GENERALIDADES DE LOS CFD.	2
1.1.3 ETAPAS EN LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.	5
1.2 MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL.	7
1.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS AL UTILIZAR METODOLOGÍA CFD.....	7
1.4 IMPORTANCIA Y UTILIDAD DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA COMO ALTERNATIVA DE DISEÑO HIDRÁULICO.	9
1.5 OBJETIVO GENERAL DEL PROYECTO DE TITULACIÓN.	10
1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL PROYECTO DE TITULACIÓN.	10
1.7 ALCANCE DEL PROYECTO DE TITULACIÓN.	11
CAPÍTULO 2	13
BASE TEÓRICA DE HIDRODINÁMICA BÁSICA	13
2.1 GENERALIDADES DE LA HIDRODINÁMICA BÁSICA.	13
2.1.1 MATERIA.	13
2.1.2 FLUIDOS.....	14
2.1.3 CINEMÁTICA DE FLUIDOS. DESCRIPCIONES EULERIANA Y LAGRANGIANA.....	15
2.1.4 CAMPO DE FLUJO.	17
2.2 SISTEMA Y VOLUMEN DE CONTROL.....	19
2.3 ECUACIONES DEL TRANSPORTE DE REYNOLDS.....	21
2.4 ECUACIONES BÁSICAS DEL MOVIMIENTO.....	22
2.4.1 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD.	23
2.4.2 ECUACIÓN DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO.....	25
2.4.3 LEY DE VISCOSIDAD DE STOKES.....	27

2.4.4	ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE ENERGÍA.	30
2.5	INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS DE TURBULENCIA.	31
2.5.1	CASCADA DE ENERGÍA.	31
2.5.2	ESCALAS DE TURBULENCIA.	33
2.5.3	MODELOS DE TURBULENCIA.	34
2.5.4	SIMULACIÓN NUMÉRICA DIRECTA (Direct Numerical Simulation, DNS).	35
2.5.5	SIMULACIÓN DE GRANDES VÓRTICES (Large Eddy Simulation, LES).	36
2.5.6	SIMULACION RANS (Reynolds Averaged Stokes).	36
2.5.7	LONGITUD DE MEZCLA DE PRANDTL.	36
2.5.8	MODELO DE DOS ECUACIONES $k - \epsilon$ ($k - \epsilon$).	37
2.5.9	MODELO DE DOS ECUACIONES $k - \omega$ ($k - \omega$).	39
2.5.10	MODELO DE TENSION DE REYNOLDS (Reynolds Stress Model, RSM).	40
2.5.11	MODELOS DE TENSIONES ALGEBRAICAS (Algebraic Stress Model, ASM).	41
2.6	NÚMEROS ADIMENSIONALES PARA CLASIFICAR A LOS FLUJOS.	41
2.7	GENERALIDADES SOBRE RÁPIDAS O CANALES DE PENDIENTE FUERTE.	43
2.7.1	FLUJOS A SUPERFICIE LIBRE.	44
2.7.2	FLUJO INESTABLE (ONDAS DE FROUDE).	49
2.8	RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE SOBRE EL DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE DESCARGA.	51
2.8.1	PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL MOVIMIENTO CON ONDULACIONES Y DE UNA MEZCLA HOMOGÉNEA DE AGUA – AIRE.	51
2.8.2	MEZCLA HOMOGÉNEA AGUA – AIRE.	52
2.8.3	FENÓMENO DE RESISTENCIA AL FLUJO CON ONDAS LONGITUDINALES.	52
2.8.4	FENÓMENO DE RESISTENCIA AL FLUJO CON INTRODUCCIÓN DE AIRE.	56

2.8.5	CONDICIONES HIDRODINÁMICAS PRESENTES A LA ENTRADA Y AL PIE DE UN CANAL DE FUERTE PENDIENTE.....	62
2.8.6	CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE CANALES DE FUERTE PENDIENTE.....	64
2.8.7	RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELO FÍSICO, ESCALA, RANGOS DE CAUDALES DE OPERACIÓN, INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	64
2.8.8	DATOS EXPERIMENTALES.....	67
	CAPÍTULO 3.....	74
	DESCRIPCIÓN DEL PAQUETE COMPUTACIONAL OpenFOAM.....	74
3.1	INTRODUCCIÓN.....	74
3.2	GENERALIDADES DE OpenFOAM.....	74
3.2.1	INSTALACIÓN DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL OpenFOAM EN LA PLATAFORMA LINUX.....	75
3.2.2	ESTRUCTURA DE UN CASO EN EL PAQUETE COMPUTACIONAL OpenFOAM.....	76
3.2.3	UNIDADES DIMENSIONALES EN OpenFOAM.....	78
3.2.4	SOLUCIONADOR DE LAS ECUACIONES QUE GOBIERNAN EL FLUJO.....	79
3.2.5	VENTAJAS Y DESVENTAJAS AL UTILIZAR EL PAQUETE COMPUTACIONAL OpenFOAM.....	80
	VENTAJAS:.....	80
3.2.6	CONSIDERACIONES DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL OpenFOAM.....	81
3.3	CRITERIOS DE TRABAJO PARA RESOLUCIÓN NUMÉRICA.....	81
3.3.1	PROCESO DE DISCRETIZACIÓN.....	82
3.3.2	DISCRETIZACIÓN DEL SISTEMA ALGEBRAICO DE ECUACIONES.....	85
3.4	MÉTODOS DE CÁLCULO PARA FLUJOS TURBULENTOS EN OpenFOAM.....	89
3.5	MODELOS DE TURBULENCIA RECOMENDADOS PARA LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.....	90

3.6	PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR UNA SIMULACIÓN NUMÉRICA EN OPENFOAM.....	91
3.7	CONDICIONES DE FRONTERA.....	92
	CAPÍTULO 4.....	94
	MODELACIÓN NUMÉRICA DE UNA RÁPIDA DE CONTORNO LISO UTILIZANDO EL PAQUETE COMPUTACIONAL OpenFOAM.....	94
4.1	GEOMETRÍA DEL MODELO NUMÉRICO.....	94
4.1.1	DESCRIPCIÓN.....	94
4.1.2	MODELO HIDRÁULICO.....	94
4.1.3	ELABORACIÓN DE LA GEOMETRÍA.....	95
4.2	ELABORACIÓN DEL MALLADO DEL DOMINIO DE ESTUDIO.....	97
4.2.1	EXPORTACIÓN DE LA MALLA A FORMATO LEGIBLE POR OpenFOAM desde GMSH.....	98
4.2.2	CARACTERÍSTICAS DE LA MALLA.....	99
4.2.3	CALIDAD DE MALLA.....	99
4.3	CONDICIONES DE FRONTERA DEL MODELO NUMÉRICO.....	101
4.4	SELECCIÓN DEL SOLUCIONADOR (SOLVER) PARA FLUJO BIFÁSICO Y CONSIDERACIONES TEÓRICAS.....	103
4.4.1	PARÁMETROS DE FASE.....	103
4.4.2	FLUJO EN LA CAPA LÍMITE.....	105
4.4.3	FUNCIONES DE PARED.....	105
4.4.4	FACTORES DE FRICCIÓN EN CANALES RUGOSOS.....	106
4.4.5	ECUACIONES DE GOBIERNO DE FLUJOS EN MOVIMIENTO.....	107
4.5	DEFINICIÓN Y SELECCIÓN DEL MODELO DE TURBULENCIA PARA LA SIMULACIÓN.....	108
4.5.1	MODELO k-omega SST (Menter's Shear Stress Transport).....	108
4.6	CONFIGURACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO.....	110
4.6.1	BOUNDARY.....	110
4.6.2	ARCHIVOS EN LA CARPETA "0".....	111
4.6.3	ARCHIVOS EN LA CARPETA "CONSTANT".....	114

4.6.4 ARCHIVOS EN LA CARPETA “SYSTEM”.....	115
4.7 CARACTERIZACIÓN DEL EQUIPO DE COMPUTACIÓN.....	116
4.8 PLAN DE PRUEBAS.	116
4.9 COMPARACIÓN, VALIDACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.	118
4.9.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS.....	119
4.9.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL MODELO NUMÉRICO FRENTE AL MODELO FÍSICO.....	119
CAPÍTULO 5.....	126
MODELACIÓN NUMÉRICA DE UNA RÁPIDA DE CONTORNO RUGOSO UTILIZANDO EL PAQUETE COMPUTACIONAL OpenFOAM.....	126
5.1 DESCRIPCIÓN.....	126
5.2 CONFIGURACIÓN DEL MODELO CON FONDO RUGOSO.....	126
5.3 PLAN DE PRUEBAS.	128
5.4 COMPARACIÓN, VALIDACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.	129
CAPÍTULO 6.....	145
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	145
6.1 CONCLUSIONES DEL PROYECTO DE TITULACIÓN.	145
6.2 CONCLUSIONES DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.....	147
6.3 RECOMENDACIONES.....	148
ANEXOS.....	152
APÉNDICE A.....	153
INSTALACIÓN DEL PAQUETE COMPUTACIONAL OpenFOAM®.....	153
APÉNDICE B.....	163
PARÁMETROS PARA EL DESARROLLO DE UNA MALLA ESTRUCTURADA EN EL PROGRAMA GMSH.....	163
APÉNDICE C.....	176
INSTRUCTIVO PARA REALIZAR LA SIMULACIÓN DE UN CASO EN OpenFOAM.....	176

TABLAS

Tabla No. 1: CLASIFICACIÓN DEL FLUJO UNIFORME CONSIDERANDO EL EFECTO VISCOSO.....	46
Tabla No. 2: CUADRO PARA CURVAS DE REMANSO EN FGV.....	47
Tabla No. 3: CONCENTRACIONES MEDIAS DE AIRE EN FUNCIÓN DE LA INCLINACIÓN DEL COLECTOR.....	59
Tabla No. 4: TIPO DE PERFIL DE FLUJO EN UN CANAL DE FUERTE PENDIENTE.....	63
Tabla No. 5: CANAL RECTANGULAR (SUPERFICIE HIDRÁULICAMENTE LISA).....	69
Tabla No. 6: CANAL RECTANGULAR (SUPERFICIE HIDRÁULICAMENTE RUGOSA).....	70
Tabla No. 7: REGISTRO DE DATOS PARA CANAL RECTANGULAR (SUPERFICIE HIDRÁULICAMENTE LISA).....	71
Tabla No. 8: REGISTRO DE DATOS PARA CANAL RECTANGULAR (SUPERFICIE HIDRÁULICAMENTE RUGOSA).....	72
Tabla No. 9: DATOS DE LABORATORIO PARA CANAL RECTANGULAR (SUPERFICIE HIDRÁULICAMENTE LISA).....	73
Tabla No. 10: DATOS DE LABORATORIO PARA CANAL RECTANGULAR (SUPERFICIE HIDRÁULICAMENTE RUGOSA).....	73
Tabla No. 11: UNIDADES BÁSICAS EN EL SISTEMA INTERNACIONAL (SI).....	78
Tabla No. 12: VARIABLES QUE INTERVIENEN EN LA SUSTITUCIÓN DE LA ECUACIÓN DE TRANSPORTE.....	85
Tabla No. 13: ESQUEMA PARA CONFIGURACIÓN DEL ARCHIVO BOUNDARY.....	111
Tabla No. 14: ESQUEMA PARA CONFIGURACIÓN DEL ARCHIVO DE FRACCIÓN VOLUMÉTRICA “alpha.water”.....	111
Tabla No. 15: ESQUEMA PARA CONFIGURACIÓN DEL ARCHIVO DE ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA “k”.....	111
Tabla No. 16: ESQUEMA PARA CONFIGURACIÓN DEL ARCHIVO DE TASA ESPECÍFICA DE DISIPACIÓN VISCOSA “omega (ω)”.....	112

Tabla No. 17: ESQUEMA PARA CONFIGURACIÓN DEL ARCHIVO.....	
DE VISCOSIDAD CINEMÁTICA TURBULENTO “nut”.	112
Tabla No. 18: ESQUEMA PARA CONFIGURACIÓN DEL ARCHIVO DE.....	
PRESIÓN MODIFICADA DE INTERFASE “p_rgh”.	113
Tabla No. 19: ESQUEMA PARA CONFIGURACIÓN DEL ARCHIVO.....	
DE VELOCIDAD “U”.	113
Tabla No. 20: ESQUEMA PARA CONFIGURACIÓN DEL ARCHIVO.....	
DE GRAVEDAD “g”.....	114
Tabla No. 21: ESQUEMA PARA CONFIGURACIÓN DEL ARCHIVO.....	
DE PROPIEDADES DE TRANSPORTE “transportProperties”, EN.....	
CONDICIONES NORMALES (T=20°C Y P=Pat).	114
Tabla No. 22: ESQUEMA PARA CONFIGURACIÓN DEL ARCHIVO.....	
DE TURBULENCIA “turbulenceProperties”.....	115
Tabla No. 23: ESQUEMA PARA CONFIGURACIÓN DEL ARCHIVO DE.....	
CONTROL D TIEMPO “controlDict”.	115
Tabla No. 24: CARACTERISTICAS DEL EQUIPO DE COMPUTACIÓN	
UTILIZADO EN LA SIMULACIÓN.	116
Tabla No. 25: CAUDALES ENSAYADOS EN MODELO FÍSICO PARA.....	
LA VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO 1.....	117
Tabla No. 26: CAUDALES ENSAYADOS EN MODELO FÍSICO PARA.....	
LA VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO 2.....	117
Tabla No. 27: CARACTERISTICAS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA	
PARA CONTORNO LISO.	118
Tabla No. 28: RELACIONES DE ESCALA Y VALORES PARA	
MODELO HIDRÁULICO CON CRITERIO DE SIMILITUD DE FROUDE.....	119
Tabla No. 29: CHEQUEO DE CONTINUIDAD EN EL MODELO.....	
NUMÉRICO 1.	120
Tabla No. 30: CAUDAL Y CALADO PARA MODELO Y PROTOTIPO.....	
EN CONTORNO LISO 1.	122
Tabla No. 31: CAUDAL Y CALADO PARA MODELO Y PROTOTIPO.....	
EN CONTORNO LISO 1.	122

Tabla No. 32: RESULTADOS OBTENIDOS EN EL MODELO FÍSICO	
PARA CONTORNO LISO.	123
Tabla No. 33: RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PROGRAMA OpenFOAM.....	
PARA CONTORNO LISO.	124
Tabla No. 34: PORCENTAJE DE DESVIACIÓN DE LOS	
RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PROGRAMA OpenFOAM FRENTE.....	
A LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL MODELO FÍSICO.	125
Tabla No. 35: ESQUEMA PARA CONFIGURACIÓN DEL ARCHIVO.....	
DE VISCOSIDAD CINEMÁTICA TURBULENTO “nut”, PARA	
CONTORNO RUGOSO.	128
Tabla No. 36: CAUDALES ENSAYADOS EN MODELO FÍSICO PARA.....	
LA VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO 3.....	128
Tabla No. 37: CAUDALES ENSAYADOS EN MODELO FÍSICO PARA.....	
LA VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO 4.....	128
Tabla No. 38: CARACTERÍSTICAS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.....	
PARA CONTORNO RUGOSO.....	129
Tabla No. 39: CHEQUEO DE CONTINUIDAD EN EL MODELO NUMÉRICO 2.....	
.....	129
Tabla No. 40: RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PROGRAMA OpenFOAM.....	
PARA CONTORNO RUGOSO.....	130
Tabla No. 41: PORCENTAJE DE DESVIACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	
OBTENIDOS EN EL PROGRAMA OpenFOAM PARA CONTORNO.....	
RUGOSO FRENTE A LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA CONTORNO.....	
LISO.....	131
Tabla No. 42: VARIACIÓN DE ENERGÍA EN LA RÁPIDA PARA CONTORNO.....	
LISO.....	132
Tabla No. 43: VARIACIÓN DE ENERGÍA EN LA RÁPIDA PARA.....	
CONTORNO RUGOSO.	133
Tabla No. 44: DESVIACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN	
CONTORNO LISO FRENTE A LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN	
CONTORNO RUGOSO.	133

FIGURAS

FIGURA No. 1. 1: METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS EN LA MECÁNICA DE..... FLUIDOS.	4
FIGURA No. 1. 2: ETAPAS PARA EL DESARROLLO DE MODELOS EN..... DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.	6
FIGURA No. 1. 3: VENTAJAS DEL MÉTODO NUMÉRICO Y MÉTODO FÍSICO. .8	8
FIGURA No. 1. 4: RESTRICCIONES DEL MÉTODO NUMÉRICO Y MÉTODO..... FÍSICO.....	9
FIGURA No. 2. 1: MATERIA DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA MECÁNICA..... DE FLUIDOS.	13
FIGURA No. 2. 2: COMPORTAMIENTO DE UN SÓLIDO Y DE UN FLUIDO..... ANTE ESFUERZOS CORTANTES.....	14
FIGURA No. 2. 3: DESCRIPCIÓN LAGRANGIANA.	15
FIGURA No. 2. 4: DESCRIPCIÓN EULERIANA (EN CUALQUIER LUGARY EN CUALQUIER INSTANTE).	16
FIGURA No. 2. 5: VARIABLES QUE DEFINEN EL CAMPO DE FLUJO.	16
FIGURA No. 2. 6: PROPIEDADES CINEMÁTICAS DE LOS FLUIDOS..... QUE DEPENDE DE LA VELOCIDAD.	17
FIGURA No. 2. 7: MASA DE MATERIA DEFINIDA EN EL ESPACIO..... (SISTEMA).....	19
FIGURA No. 2. 8: DESCRIPCIÓN DE SISTEMA.	20
FIGURA No. 2. 9: TEOREMA DE TRANSPORTE DE REYNOLDS.....	21
FIGURA No. 2. 10: EQUILIBRIO DE UNA PARTICULA EN REPOSO.	24
FIGURA No. 2. 11: FUERZAS SUPERFICIALES QUE ACTÚAN EN LA..... DIRECCIÓN DEBIDO AL TENSOR ESFUERZO APLICADO A UN VOLUMEN..... DE CONTROL.	27
FIGURA No. 2. 12: CASCADA DE ENERGÍA (Escala de Turbulencia).....	32
FIGURA No. 2. 13: ESPECTRO DE ENERGIA TURBULENTO.....	34
FIGURA No. 2. 14: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE TURBULENCIA.....	35
FIGURA No. 2. 15: MODELO DE LONGITUD MIXTA <i>lm</i>	37

FIGURA No. 2. 16: CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO UNIFORME.	45
FIGURA No. 2. 17: CURVAS DE REMANSO PARA FGV.	48
FIGURA No. 2. 18: ONDAS DE FROUDE A LO LARGO DEL COLECTOR.....	
(BROCK 1969).....	49
FIGURA No. 2. 19: DIAGRAMA DE LOS LÍMITES DE ESTABILIDAD..... EN	
COLECTORES DE GRAN PENDIENTE Y SECCIONES	
HIDRÁULICAMENTE RUGOSAS Y LISAS.....	53
FIGURA No. 2. 20: CARACTERÍSTICAS DE LAS ONDAS DE FROUDE.....	
PARA UN COLECTOR DE CONTORNO HIDRÁULICAMENTE LISO.	54
FIGURA No. 2. 21: INFLUENCIA DE LA INESTABILIDAD SOBRE.....	
EL COEFICIENTE DE RESISTENCIA Y DE DARCY-WEISBACH EN UN.....	
CANAL DE $B > 5Y$	55
FIGURA No. 2. 22: FORMACIÓN Y DESARROLLO DEL FLUJO.....	
TURBULENTO TOTALMENTE AUTOAIREADO.	56
FIGURA No. 2. 23: RELACIÓN FUNCIONAL ENTRE LOS COEFICIENTES DE.....	
FRICCIÓN INTERNA PARA FLUJO TOTALMENTE AIREADO, λ_c PARA.....	
FLUJO SIN AIRE AL INICIO DE LA ADMISIÓN DE AIRE, λ_a	
Y LA CONCENTRACIÓN MEDIA DE AIRE \bar{c}	58
FIGURA No. 2. 24: DISTRIBUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE AIRE.....	
EN DIRECCIÓN NORMAL AL FONDO DEL COLECTOR PARA	
FLUJO UNIFORME AUTOAIREADO Y EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO.....	
DE INCLINACIÓN DEL COLECTOR.	59
FIGURA No. 2. 25: DIAGRAMA PARA EL CÁLCULO DE FLUJO NO UNIFORME... CON AUTOAIREACIÓN SEGÚN WOOD (1987).	61
FIGURA No. 2. 26: ENTREGA EN UN CANAL CON FLUJO SUPERCRÍTICO..	62
FIGURA No. 2. 27: PERFILES DE FLUJO PARA CAMBIOS DE PENDIENTE..... DE COLECTORES Y CAMBIOS DE RUGOSIDAD.....	63
FIGURA No. 2. 28: ESQUEMA DE MEDICIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES.... EN LA RÁPIDA.	65
FIGURA No. 2. 29: SECCIÓN RECTANGULAR TRANSVERSAL DEL..... CANAL.....	65

FIGURA No. 3. 1: ESQUEMA DE LA ESTRUCTURA GENERAL DEL PAQUETE..... COMPUTACIONAL OpenFOAM CON SUS HERRAMIENTAS A UTILIZAR EN..... UNA SIMULACIÓN NUMÉRICA COMPLETA.	75
FIGURA No. 3. 2: DIRECTORIO DEL ESQUEMA NUMÉRICO EN..... OpenFOAM DE UN CASO EN GENERAL.	76
FIGURA No. 3. 3: DISCRETIZACIÓN ESPACIAL O DE DOMINIO.	82
FIGURA No. 3. 4: DIMENSIONES EN UN VOLUMEN DE CONTROL.	83
FIGURA No. 3. 5: VARIACIÓN TEMPORAL DE LA VARIABLE ϕ	83
FIGURA No. 3. 6: DISCRETIZACIÓN CON 5 NODOS.	86
FIGURA No. 3. 7: ESQUEMA DE MALLA FINA Y MALLA MUY GRUESA.	87
FIGURA No. 3. 8: CATEGORIAS DEL MALLADO.	88
FIGURA No. 3. 9: ESQUEMA DE LOS MÉTODOS DE CALCULO PARA FLUJOS TURBULENTOS EN OpenFOAM.	90
FIGURA No. 4. 1: GEOMETRIA DEL DOMINIO DE ESTUDIO (2D).	96
FIGURA No. 4. 2: GEOMETRIA 3D DEL DOMINIO DE ESTUDIO	97
FIGURA No. 4. 3: ESQUEMA DE MALLA MIXTA ELABORADA EN GMSH.	98
FIGURA No. 4. 4: CATEGORIAS DEL MALLADO DESDE EL TERMINAL.	99
FIGURA No. 4. 5: CATEGORIAS DEL MALLADO DESDE EL TERMINAL.	100
FIGURA No. 4. 6: “MESH QUALITY” EN PARAVIEW.	101
FIGURA No. 4. 7: CONDICIONES DE FRONTERA EN LA ESTRUCTURA..... DE ESTUDIO.	102
FIGURA No. 4. 8: CONDICIÓN DE CAPA LÍMITE PARA UN CANAL..... A SUPERFICIE LIBRE.	105
FIGURA No. 4. 9: LEY DE LA PARED.	106
FIGURA No. 4. 10: FLUCTUACIONES DEL CALADO A LA SALIDA DE..... LA ESTRUCTURA – CONTORNO LISO.	121
FIGURA No. 4. 11: SECCIONES DEL CANAL DE FUERTE PENDIENTE..... (RÁPIDA).	122
FIGURA No. 4. 12: INTEGRACIÓN DE LA FRACCIÓN VOLUMÉTRICA PARA LA LECTURA DEL CALADO.	124

FIGURA No. 5. 1: TAMAÑO DEL GRANO DE ARENA EN EL PAPEL LIJA	
SEGÚN SU NUMERACIÓN.	127
FIGURA No. 5. 2: FLUCTUACIONES DEL CALADO A LA SALIDA DE.....	
LA ESTRUCTURA – CONTORNO RUGOSO.....	130
FIGURA No. 5. 3: ESQUEMA DE SECCIONES A CONSIDERAR PARA.....	
DETERMINAR ENERGÍAS EN EL SISTEMA.	132
FIGURA No. 5. 4: DIAGRAMAS DE DESVIACIÓN EN DISIPACIÓN DE.....	
ENERGÍA PARA LOS CAUDALES ENSAYADOS EN CONTORNO LISO.....	
Y CONTORNO RUGOSO.....	133
FIGURA No. 5. 5: FRACCIÓN VOLUMÉTRICA (ALPHA.WATER).....	135
FIGURA No. 5. 6: FRACCIÓN VOLUMÉTRICA Vs. ALTURA DE LAS	
PAREDES AL INICIO DEL CANAL DE FUERTE PENDIENTE.....	136
FIGURA No. 5. 7: FRACCIÓN VOLUMÉTRICA Vs. ALTURA DE LAS.....	
PAREDES AL FINAL DEL CANAL DE FUERTE PENDIENTE.....	137
FIGURA No. 5. 8: CALADO EN LA SECCIÓN INICIAL DE LA RÁPIDA.	138
FIGURA No. 5. 9: CALADO EN LA SECCIÓN FINAL DE LA RÁPIDA.	139
FIGURA No. 5. 10: VELOCIDADES A LO LARGO DE LA RÁPIDA.....	140
FIGURA No. 5. 11: VELOCIDADES REALIZANDO UN CORTE EN LA SECCIÓN... TRANSVERSAL DE LA RÁPIDA.	141
FIGURA No. 5. 12: PERFIL DE VELOCIDADES EN EL CANAL - INICIO DELA RÁPIDA.	142
FIGURA No. 5. 13: PERFIL DE VELOCIDADES EN EL CANAL - FINAL DE..... LA RÁPIDA.	143
FIGURA No. 5. 14: VECTORES VELOCIDAD.....	144
FIGURA No. A. 1: DESCARGA DEL PAQUETE COMPUTACIONAL.....	
OpenFOAM 3.0.1.....	153
FIGURA No. A. 2: PROCEDIMIENTO MEDIANTE COMANDOS PARA.....	
INSTALACIÓN DEL PAQUETE COMPUTACIONAL OpenFOAM 3.0.1.....	153
FIGURA No. A. 3: ACCESO A LA APLICACIÓN “TERMINAL” PARA INGRESO..... DE COMANDOS.....	154
FIGURA No. A. 4: COMANDOS PARA UNA NUEVA INSTALACIÓN.	154

FIGURA No. A. 5: NUEVA INSTALACIÓN, PRIMER COMANDO DENTRO.....	
DE LA PARTE 1.....	155
FIGURA No. A. 6: NUEVA INSTALACIÓN, SEGUNDO COMANDO DENTRO.....	
DE LA PARTE 1.....	155
FIGURA No. A. 7: NUEVA INSTALACIÓN, COMANDO DENTRO DE LA.....	
PARTE 2.....	156
FIGURA No. A. 8: NUEVA INSTALACIÓN, COMANDO DENTRO DE LA	
PARTE 3.....	157
FIGURA No. A. 9: NUEVA INSTALACIÓN, COMANDO DENTRO DE LA	
PARTE 4.....	158
FIGURA No. A. 10: COMANDOS PARA CONFIGURACIÓN DE USUARIO	158
FIGURA No. A. 11: CONFIGURACIÓN DE USUARIO, COMANDO DENTRO.....	
DE LA PARTE 1.....	159
FIGURA No. A. 12: CONFIGURACIÓN DE USUARIO, COMANDO DENTRO.....	
DE LA PARTE 2.....	159
FIGURA No. A. 13: CONFIGURACIÓN DE USUARIO, COMANDO DENTRO.....	
DE LA PARTE 3.....	160
FIGURA No. A. 14: CONFIGURACIÓN DE INICIO, PRIMER COMANDO.	161
FIGURA No. A. 15: CONFIGURACIÓN DE INICIO, COMANDOS DE.....	
EJECUCIÓN DE PARAVIEW.....	162
FIGURA No. A. 16: PANTALLA PRINCIPAL DE LA APLICACIÓN	
PARAVIEW.....	162

FOTOGRAFÍAS

Fotografía No. 1: RÁPIDA DE DESCARGA MODELO QUEBRADA BATÁN.....	66
Fotografía No. 2: UBICACIÓN DE PIEZÓMETROS.	67
Fotografía No. 3: SISTEMA PIEZOMÉTRICO, PARA LA DETERMINACIÓN ... DE CAUDALES (EPN-EMAAPQ/2000).....	67
Fotografía No. 4: INSTRUMENTO DE MEDICIÓN DE LA CARGA DE VELOCIDAD (Tubo Prandtl).....	68
Fotografía No. 5: MODELO FÍSICO EN EL LABORATORIO (Escala 1:25).	95

SIMBOLOGÍA

\bar{c} =	Concentración media de aire.
\bar{c}_n =	Concentración media de aire a lo largo de la profundidad de agua clara.
Fr^* =	Número de Froude para estabilidad neutral.
Fr_{cr} =	Valor crítico de Froude.
Fr_n =	Froude para Flujo Uniforme.
h_r =	Profundidad real de agua con inclusión de aire.
m =	Masa.
l_e =	Pendiente de la Línea de Energía.
l_w =	Pendiente de la Superficie de Agua.
L_a =	Representa la longitud del colector necesaria para que se desarrolle la capa límite y aparezca en la superficie libre.
L_b =	Es la longitud que requiere el flujo para lograr que el aire llegue al fondo y se constituya la mezcla homogénea de agua-aire.
n =	Coefficiente de rugosidad de Manning.
R_h =	Radio hidráulico.
μ =	Coefficiente de Viscosidad.
y =	Distancia de la partícula desde las paredes del contorno.
y_n =	Profundidad de agua clara (sin aire).
y_c =	Profundidad crítica de flujo.
y_{90} =	Profundidad del agua con 90% de introducción de aire.
$y_{m\acute{a}x}$ =	Valor medio de la profundidad máxima del agua.
Y_{min} =	Valor medio de la profundidad mínima del agua.
ρ =	Densidad del agua.
ρ_a =	Densidad del aire.
k =	Rugosidad Absoluta Teórica.
k_s =	Rugosidad Absoluta (OpenFOAM).
τ =	Esfuerzo cortante debido a la resistencia por fricción que ofrece el conducto.

- $\lambda =$ Coeficiente de fricción interna, función del número de Reynolds, rugosidad relativa, forma de la sección transversal y estructura de la rugosidad a lo largo del perímetro mojado y a lo largo del colector.
- $\lambda_c =$ Coeficientes de fricción interna para flujo totalmente aireado.
- $\lambda_a =$ Coeficientes de fricción interna para flujo sin aire al inicio de la admisión.
- $dV/dy =$ Gradiente de Velocidad.
- $V_n =$ Velocidad de agua clara.
- $V =$ Velocidad media.
- $V_{90} =$ Velocidad con el 90% de concentración de aire.
- $X =$ Distancia a la sección de entrada.

RESUMEN

La presente investigación tiene como finalidad realizar la simulación numérica en el paquete computacional OpenFOAM mediante la metodología CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) de un canal de fuerte pendiente, a fin de evaluar el comportamiento de los parámetros hidráulicos, que serán validados con los resultados del proyecto de titulación “ANÁLISIS DE FLUJO INESTABLE Y AUTOAIREADO EN CANALES FUERTE PENDIENTE”.

Hoy en día la implementación de la Dinámica de Fluidos Computacionales para la simulación numérica es muy importante en evaluar el comportamiento del flujo, así como la interacción con los contornos sólidos de las estructuras hidráulicas analizadas, siempre y cuando el modelo numérico sea validado y calibrado con un modelo físico.

La investigación tiene como finalidad enfocarse en el tramo inclinado del canal a fin de conocer los posibles efectos al realizar cambios en el valor de la rugosidad en el fondo, y en lo posterior analizar el comportamiento de la disipación donde se presente flujo en régimen supercrítico ($Fr > 1$) y valores de Reynolds altos. Al modificar la rugosidad se obtuvo un aumento en la disipación de energía resultando favorable en la disminución de las velocidades.

Para construir una obra civil hidráulica eficiente y que cumpla con la vida útil propuesta en el diseño, en la actualidad se debe apoyar en modelos numérico y ensayar con diferentes caudales y obtener parámetros hidráulicos para poder compararlos con resultados teóricos. En el pasado la simulación numérica fue un limitante tecnológico y económico que no se podía considerar como alternativa para el diseño hidráulico.

ABSTRACT

This research aims to perform the numerical simulation in the computational package OpenFOAM through the CFD methodology (Computational Fluid Dynamics) of a high slope channel. This pretends to evaluate the behavior of the hydraulic parameters, which will be validated with the results of the titling project "Analysis of Unstable Flow and Self Aeration of High Slope Channels"

Nowadays, the implementation of the Computational Fluid Dynamics (CFD) for the numerical simulation is very important in order to evaluate the behavior of the flow, as well as the interaction with the solid contours of the analyzed hydraulic structures. As long as the numerical model is validated and calibrated with a physical model.

The research aims to focus in the inclined section of the channel to get to know the possible effects when making changes in the value of the rugosity in the bottom and then analyze the behavior of the dissipation where streams with supercritical flow ($Fr > 1$) and high Reynolds values are presented. When modifying the rugosity, it was obtained an increase in the energy dissipation, being favorable in the decrease of velocities.

To build an efficient hydraulic civil work that complies with the useful life proposed in the design, nowadays, it is necessary to make use of numerical models, test with different discharges and obtain hydraulic parameters to be able to compare them with theoretical results. In the past, the numerical simulation was a technological and economic limitation that couldn't be considered as an alternative to the hydraulic design.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA.

1.1.1 ANTECEDENTES DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD).

En la década de 1930, las limitaciones tecnológicas para el desarrollo de los estudios analíticos fueron una motivación para el desarrollo de metodologías computacionales. Sin embargo la primera simulación numérica (sin computador) del flujo alrededor de un cilindro fue realizada en 1933 en Inglaterra por A.Thom, y comunicado por G.I. Taylor. Los resultados fueron validados por M. Kawaguti en Japón una vez que resolvió las ecuaciones de Navier-Stokes para el flujo alrededor del cilindro para un Número de Reynolds de 40. El tiempo que le tomó resolver la integración numérica fue un año y medio; trabajando en los cálculos 20 horas semanales con la ayuda de una calculadora.¹

Las estructuras hidráulicas como obras de captación, conducción, tratamiento y distribución de agua para consumo; así como las estructuras de evacuación de aguas servidas son de gran importancia para garantizar un estilo de vida adecuado en la sociedad. Debido a la creciente necesidad de estas obras de saneamiento y agua potable, los avances científicos y tecnológicos en hardware y software resultan útiles para la resolución numérica de sistemas matemáticos muy complejos en materia de mecánica de fluidos. La solución de estos sistemas complejos como las ecuaciones en derivadas parciales no lineales de Navier-Stokes a través de software especializado permite disminuir el tiempo de resolución.

Aplicaciones Computacionales como Flow 3D y ANSYS (código privado), OpenFOAM (código libre), entre otras, se utilizan en el campo de la dinámica de

¹ Daniel Valero H. (2015). Modelación Hidráulica de flujos multifase de grandes presas. Aplicación de cuencos de amortiguación: Tesis Final de Master. *Universitat Politècnica de Valencia*.

fluidos computacional (Computational Fluid Dynamic - CFD) para la verificación y optimización de problemas relacionados con la mecánica de fluidos, como complemento a la modelación física y al desarrollo teórico.

Los CFD tienen orientación y aplicación en áreas de ingeniería como Hidráulica, Mecánica, Química, Medicina, entre otras, las cuales realizan el estudio matemático del movimiento tridimensional de los fluidos mediante las Ecuaciones de Navier-Stokes que se basan en los principios de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía que proporciona los fundamentos teóricos de hidráulica de canales y tuberías.²

Actualmente, en la rama de Mecánica de Fluidos, el CFD se han convertido en herramientas fundamentales utilizadas para el estudio e investigación del comportamiento de los fluidos sometidos a diferentes condiciones físicas, geométricas y químicas. Son una herramienta útil para obtener la solución numérica de fenómenos que se presentan en los flujos, partiendo de las Ecuaciones de Navier-Stokes que describen el movimiento en tres dimensiones de un fluido desde una perspectiva teórica. Estas ecuaciones son representativas en la dinámica de fluidos ya que consideran términos de viscosidad y disipación de energía.

Los CFD, ayuda a optimizar tiempo y reducir recursos económicos respecto a los cambios que deben realizarse al modelo físico siempre y cuando los resultados del modelo numérico sean validados y calibrados con los resultados del modelo físico, o con los resultados de otro modelo numérico previamente calibrado.

1.1.2 GENERALIDADES DE LOS CFD.

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

² Villamizar Hernández, A. (2014). Aplicación de un modelo turbulento bidimensional para la simulación de un flujo a superficie libre en un canal horizontal. Bogotá, Colombia.

de ecuaciones que gobiernan el comportamiento tridimensional de un fluido a través de métodos numéricos y algoritmos.³

Los CFD realiza cálculos de sistemas donde intervienen fluidos, resolviendo las ecuaciones fundamentales: conservación de masa, cantidad de movimiento y energía, para el dominio considerado.

A través de la simulación numérica ha sido posible obtener resultados tridimensionales aceptables que representan el comportamiento muy aproximado al real del flujo para las variables características del sistema como velocidad, presión, temperatura, etc. Las mismas que no sería posible determinar utilizando métodos tradicionales de cálculo.

Tomando como referencia la implementación de un modelo numérico CFD para estudiar el comportamiento hidráulico del vertedero del Lago Gatún⁴, se deseaba comprobar la confiabilidad y efectividad al desarrollar un modelo numérico. Esta implementación se da por la incertidumbre generada luego de comparar los resultados de capacidad de descarga del vertedero obtenidos con un modelo físico frente al modelo teórico.

Después de realizar las mediciones en el modelo físico, la capacidad de descarga que se obtuvo fue significativamente menor a la representada en la curva de descarga teórica asumida para la operación del vertedero.

Los resultados de validación de la capacidad de descarga fueron consistentes con la observación efectuada en el modelo físico. Ante la baja capacidad de descarga que se obtuvo en el vertedero, el modelo numérico sirvió para realizar una evaluación rápida de las alternativas de optimización a implementarse para incrementar la capacidad de descarga en el vertedero, como: reducción del nivel del lago, implementación de taludes y bermas laterales o modificación de las

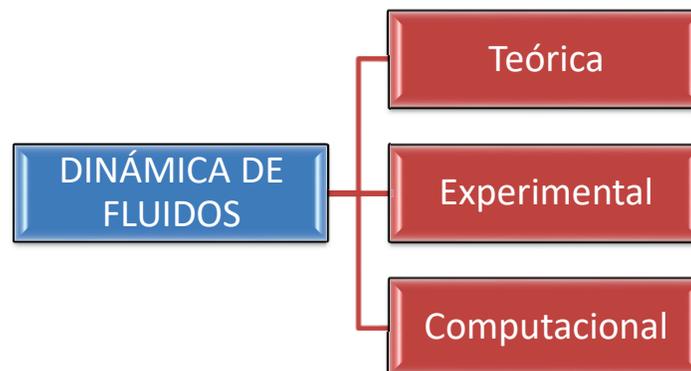
³ Martínez Salazar, M. (2011). Determinación del flujo másico para disminuir la temperatura en el andén del metro de la ciudad de México. Veracruz, México.

⁴ Sabarots Gerbec, M., Bandano, N., & Menéndez, Á. (Agosto de 2014). Estudio de Optimización Hidráulica del vertedero Gatún mediante modelación CFD. XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA. Santiago, Chile.

narices de las pilas. La construcción de estas alternativas en modelo físico hubiera tomado mayor tiempo y mayor inversión de recursos económicos.

En la dinámica de fluidos existen tres metodologías para realizar el análisis del comportamiento del flujo en un determinado problema de ingeniería, como se puede observar en la Figura No. 1.1.

FIGURA No. 1. 1: METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS EN LA MECÁNICA DE FLUIDOS.⁵



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

La simulación numérica se ha convertido en una alternativa confiable a la hora de resolver problemas aplicados al diseño en ingeniería, complementándose con los métodos tradicionales como el teórico y el experimental, utilizados por mucho tiempo.

La aplicación de los CFD en el campo de la ingeniería permite al diseñador prever el comportamiento de los fluidos en una estructura hidráulica con la finalidad de realizar posteriores mejoras en los modelos analizados, partiendo de información recopilada en prototipos o modelos físicos que permiten la calibración del modelo numérico.

La modificación de un modelo numérico es una tarea que requiere de menos recursos materiales, económicos y de tiempo respecto a realizar la modificación de

⁵ Carrillo Sánchez, J. M. (2012). Programa de Doctorado: Medio Ambiente y Minería Sostenible. TRABAJO FIN DE PERÍODO FORMATIVO.

un modelo físico; recalcando que esta metodología complementa el campo de la hidráulica experimental.

Es recomendable la combinación de los tres métodos en simultáneo para encaminar la solución del problema de manera exacta y apegada a la realidad.

La implementación y utilización de estas herramientas va a la par con el avance tecnológico y computacional, puesto que cada vez aparecen en el mercado ordenadores con mayor capacidad de procesamiento de datos, facilitando la manipulación y simulación numérica utilizando metodología CFD, lo que resulta una tarea ardua sin la ayuda de un ordenador de alta velocidad; puesto que las ecuaciones diferenciales que gobiernan el flujo se resuelven en cada elemento del mallado de manera iterativa.

Con la implementación de modelos numéricos, el ingeniero, busca realizar una representación simplificada del prototipo con geometría y condiciones de flujo equivalentes al modelo físico.⁶

1.1.3 ETAPAS EN LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.

Para proceder al desarrollo de un modelo para simulación numérica (1D, 2D, 3D) de manera ordenada, se propone la siguiente secuencia por etapas:

- Generación del modelo geométrico.
- Desarrollo del Mallado.
- Condiciones de contorno, propiedades de los elementos y fluidos.
- Solución iterativa de las Ecuaciones (proceso realizado por el computador).
- Análisis e interpretación de Resultados.

⁶ Castro D. Marco; Hidalgo B. Ximena; Poveda F Rafael.: Sobre Modelación Numérica en Obras de Saneamiento Básico. Quito-Ecuador.

FIGURA No. 1. 2: ETAPAS PARA EL DESARROLLO DE MODELOS EN DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.⁷



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

⁷ Martínez Salazar, M. (2011). Determinación del flujo másico para disminuir la temperatura en el andén del metro de la ciudad de México. Veracruz, México.

1.2 MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL.

Los modelos hidrodinámicos tridimensionales tienen su aplicación sobre flujos turbulentos a superficie libre donde la simulación debe cumplir con las condiciones de frontera y modelo de turbulencia adecuado para tener resultados de velocidades y distribución de presiones muy aproximada y confiable; similar a lo que sucedería en la realidad con un prototipo del problema que se haya planteado. Estos modelos utilizan ecuaciones generales de flujo como:

- Principio de Conservación de Masa (Ecuación de Continuidad).
- Segunda Ley de Newton (Ecuaciones de Navier-Stokes), Conservación de la Cantidad de Movimiento.
- Principio de Conservación de la Energía (Ecuación de Energía).

La estructura de estas ecuaciones diferenciales de conservación, permiten obtener mediante su resolución las tres componentes de velocidad (u , v , w) en un punto cualquiera para un instante de tiempo (t) determinado: $u(x, y, z, t)$, $v(x, y, z, t)$ y $w(x, y, z, t)$, así como la distribución de presiones $P(x, y, z, t)$, densidad $\rho(x, y, z, t)$ y temperatura $T(x, y, z, t)$, en un instante de tiempo (t).⁸

El modelo tridimensional tiene gran importancia ya que brinda la posibilidad de obtener resultados y criterios reales del comportamiento del flujo de un problema hidráulico planteado, utilizando la simulación numérica en cualquier punto del espacio y en un tiempo determinado.

1.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS AL UTILIZAR METODOLOGÍA CFD.

La modelación física y la metodología de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) junto al desarrollo teórico, son métodos utilizados para el análisis de

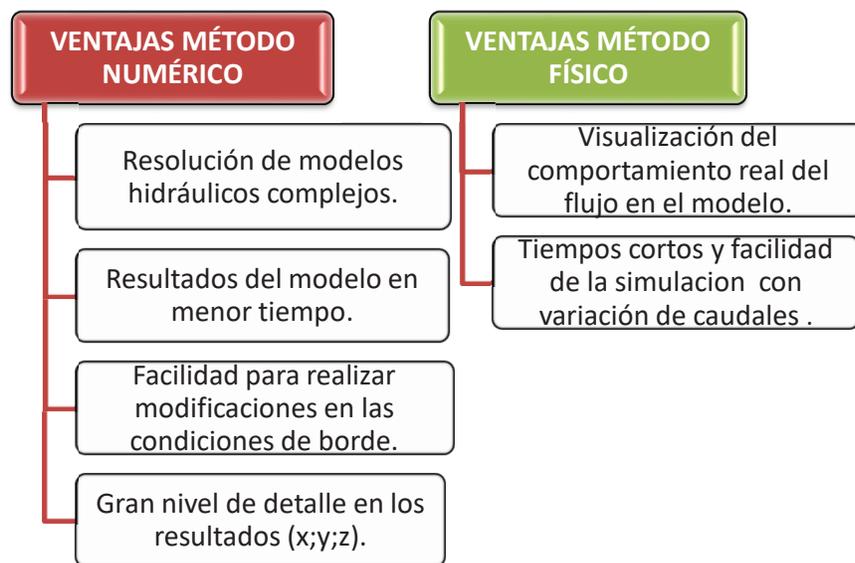
⁸ Carrillo Sánchez, J. M. (2012). Programa de Doctorado: Medio Ambiente y Minería Sostenible. TRABAJO FIN DE PERÍODO FORMATIVO.

problemas en Mecánica de Fluidos debido a que estos métodos están relacionados. Se deben considerar las ventajas y desventajas que se presentarán al utilizar los métodos antes mencionados para obtener resultados aceptables en la investigación, tanto en el modelo físico como en el modelo numérico.

Una de las ventajas del uso de CFD es que permite el diseño de estructuras de geometrías y dimensiones variadas, facilita trabajar con diferentes alternativas y condiciones de contorno en los modelos, sin embargo, también presentan restricciones ya que para llevar a cabo las simulaciones se necesita equipos de cómputo de gran capacidad.

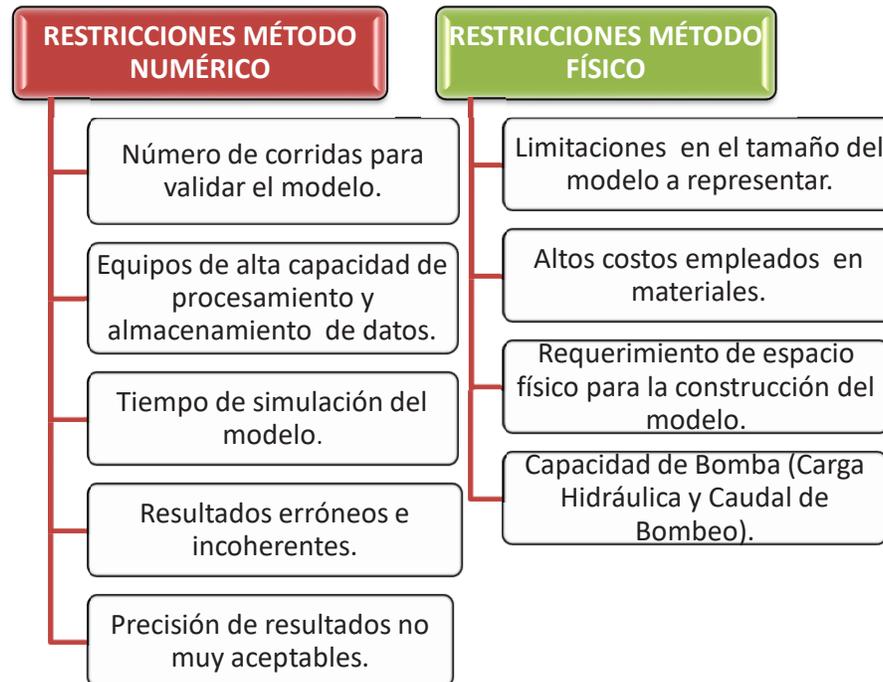
Las herramientas de simulación numérica facilitan entender los fenómenos hidráulicos presentes en el problema, además permiten optimizar los diseños, validar la estructura del modelo y prever los requerimientos necesarios que deben cumplirse antes de ser construida para un correcto funcionamiento.

FIGURA No. 1. 3: VENTAJAS DEL MÉTODO NUMÉRICO Y MÉTODO FÍSICO.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana

FIGURA No. 1. 4: RESTRICCIONES DEL MÉTODO NUMÉRICO Y MÉTODO FÍSICO.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

1.4 IMPORTANCIA Y UTILIDAD DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA COMO ALTERNATIVA DE DISEÑO HIDRÁULICO.

La necesidad de mejorar y optimizar los diseños de obras hidráulicas aprovechando los avances tecnológicos, ha llevado a muchos diseñadores a recurrir a la modelación de estructuras utilizando métodos numéricos a la par de la modelación física y de esa manera evidenciar posibles errores en los diseños para realizar las correcciones necesarias.

La modelación numérica, en los últimos años, ha ocupado un lugar importante en la Ingeniería Hidráulica debido al desarrollo de software que permite modelar flujo unidimensional, bidimensional y tridimensional a fin de llevar a cabo el diseño de los proyectos.

Las estructuras hidráulicas con flujo a superficie libre son las más comunes para la implementación de modelos numéricos tridimensionales, donde la precisión depende del correcto ingreso de datos iniciales como los parámetros geométricos e hidráulicos (cauda), condiciones de borde, modelo de turbulencia adecuado y discretización de las ecuaciones que gobiernan el flujo como las ecuaciones de Navier-Stokes.

1.5 OBJETIVO GENERAL DEL PROYECTO DE TITULACIÓN.

El objetivo principal del proyecto es realizar una simulación numérica en el paquete computacional OpenFOAM (CFD) para un canal de fuerte pendiente, calibrado mediante los resultados obtenidos en modelo teórico y físico del proyecto de titulación “ANÁLISIS DE FLUJO INESTABLE Y AUTOAIREADO EN CANALES DE FUERTE PENDIENTE⁹.

1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL PROYECTO DE TITULACIÓN.

- Comprender la base teórica que permite generar la simulación numérica utilizando metodología CFD, mediante el análisis de los conceptos de dinámica de fluidos.
- Identificar las ecuaciones que gobiernan la simulación numérica utilizando metodología CFD mediante el uso del programa computacional OpenFOAM.
- Conocer las ventajas y limitaciones del programa OpenFOAM para la simulación de estructuras hidráulicas.
- Evaluar y comparar los resultados obtenidos en la simulación numérica frente a los obtenidos en el modelo físico en la fase de calibración.

⁹ Haro P. & Jara M. (2010). Análisis de flujo inestable y auto aireado en canales de fuerte pendiente. Tesis Previa a la Obtención de Magister (Msc): Escuela Politécnica Nacional.

- Evaluar el comportamiento hidráulico y las características del flujo en una estructura de fuerte pendiente con cambios en la rugosidad de fondo.
- Presentar el instructivo para configurar el modelo numérico de la rápida de fuerte pendiente en el paquete computacional OpenFOAM.

1.7 ALCANCE DEL PROYECTO DE TITULACIÓN.

Hoy en día la implementación de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es muy importante para analizar y evaluar el comportamiento del flujo en estructuras hidráulicas, siempre y cuando el modelo numérico sea validado y calibrado con un modelo físico.

La investigación tiene como finalidad enfocarse en el tramo de la rápida (canal de pendiente fuerte), a fin de conocer cuál sería los efectos al cambiar la rugosidad del fondo y evaluar el cambio en la tasa de disipación de energía, donde se visualicen problemas que se presentan en flujos con valores de Reynolds altos y Froude mayores a la uno ($Fr > 1$).

La modelación numérica del flujo sobre una rápida permitirá evaluar el comportamiento de flujo y su interacción con la estructura, la cual debe considerar los efectos de aireación y presencia de ondas superficiales. El éxito de la simulación numérica radica en la correcta selección de las condiciones de frontera y del modelo de turbulencia a utilizar.

La metodología que se utilizará para la realización de este proyecto será:

- a. Planteamiento del Problema:
 - a.1) Implementación y utilización de la metodología CFD con el uso del paquete computacional OpenFOAM para la simulación numérica de estructuras hidráulicas, en este caso sobre canales de pendiente fuerte.
- b. Método de Trabajo:

- b.1) Familiarización con la interfaz de usuario del programa.
- b.2) Calibración del modelo en el programa utilizando la información obtenida en el modelo físico del Proyecto de Titulación “ANÁLISIS DE FLUJO INESTABLE Y AUTOAIREADO EN CANALES DE FUERTE PENDIENTE¹⁰ y con el ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO DE LAS OBRAS DE DERIVACIÓN Y DESVÍO DE LA QUEBRADA EL BATÁN (Informe Fase A)”.
 - b.3) Ejecución de los casos, mismos que corresponden a los caudales ensayados en modelo físico.
- c. Selección de la alternativa óptima para mejorar la disipación de energía en canales con pendientes fuertes:

Se optará por variar la rugosidad en el fondo del canal para reducir la velocidad del flujo.
- d. Interpretación, comparación y validación de los datos obtenidos en el modelo físico.
- e. Establecer conclusiones y recomendaciones.

¹⁰ Haro P. & Jara M. (2010). Análisis de flujo inestable y auto aireado en canales de fuerte pendiente. Tesis Previa a la Obtención de Magister (Msc): Escuela Politécnica Nacional.

CAPÍTULO 2

BASE TEÓRICA DE HIDRODINÁMICA BÁSICA

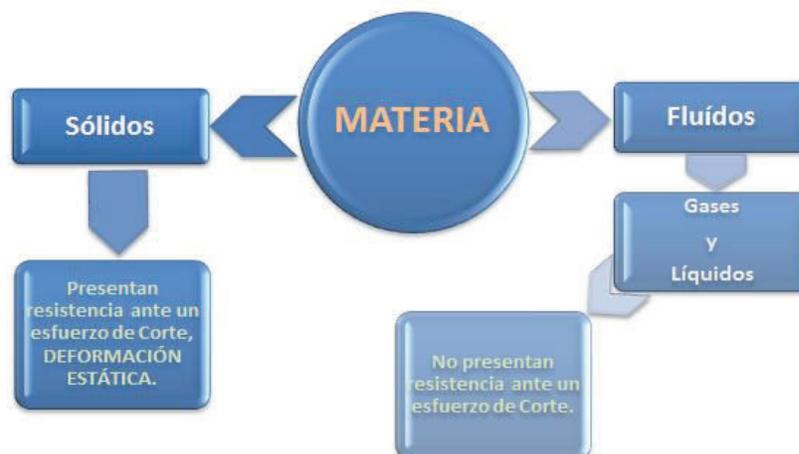
2.1 GENERALIDADES DE LA HIDRODINÁMICA BÁSICA.

El presente capítulo tiene como objetivo estudiar y describir la base teórica de los principios que rigen el equilibrio y movimiento de fluidos incompresibles (líquidos) para sistemas de conducción a superficie libre, así como la interacción de los fluidos con sólidos o con otros fluidos en las fronteras.¹¹ Las leyes de Conservación de Masa y de Energía e Impulso son prioritarias para el estudio de los fluidos.

2.1.1 MATERIA.¹²

Desde el punto de vista de la Mecánica de Fluidos la materia puede presentarse en estado sólido y fluido, donde técnicamente difieren uno de otro en su reacción ante un esfuerzo tangencial o de corte.

FIGURA No. 2. 1: MATERIA DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

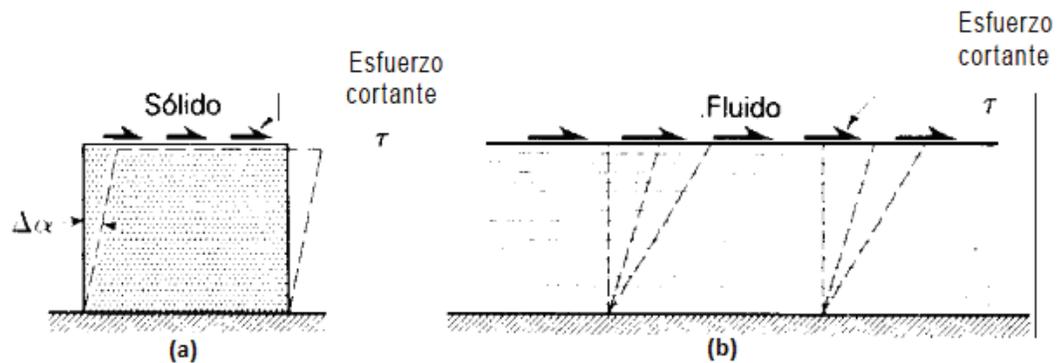
¹¹ Cengel, Y., & Cimbala, J. (2006). Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones. México, D.F.: McGraw Hill.

¹² White, F. (2004). Mecánica de Fluidos. España.: McGraw Hill.

2.1.2 FLUIDOS.¹³

Es toda sustancia que cambia continuamente de forma cuando está sometido a un esfuerzo cortante. Ante la presencia de un agente externo sus moléculas cambian de posición relativa sin presentar resistencia al desplazamiento entre ellas.

FIGURA No. 2. 2: COMPORTAMIENTO DE UN SÓLIDO Y DE UN FLUIDO ANTE ESFUERZOS CORTANTES.



FUENTE: Shames, I. (1995). *Fluidos y el Continuo*. En *Mecánica de Fluidos*. (pp.3-4). Colombia: Mc Graw Hill.

En la figura (a) el sólido cambia de forma proporcionalmente, caracterizada por el ángulo $\Delta\alpha$ ante un esfuerzo cortante (deformación estática) y en la figura (b) el fluido tiene una deformación continua, no tiene un ángulo $\Delta\alpha$ fijo aunque se aplique un esfuerzo cortante infinitesimal.

Fluidos Newtonianos y No Newtonianos¹⁴.- Un fluido es Newtoniano cuando el esfuerzo tangencial es linealmente proporcional a la rapidez de deformación angular, partiendo de un esfuerzo y deformación igual a cero, ejemplo el agua, la gasolina, el aire y otros gases, así como los líquidos con base de aceites. Se denomina No Newtoniano a un fluido donde la proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación es variable, ejemplo los fangos, la sangre, las soluciones de polímeros, la pasta dental, lahares, entre otras.

¹³ Shames, I. (1995). *Mecánica de Fluidos*. Colombia.: Mc Graw Hill.

¹⁴ Daily, J., & Harleman, D. (1975). *Dinámica de los Fluidos con aplicaciones en la Ingeniería*. México.: Trillas.

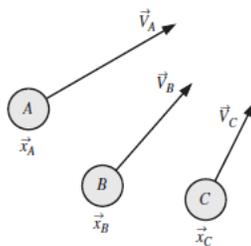
Materia Homogénea y Continua (Medio Continuo). - Un fluido es continuo debido que las propiedades del fluido varia muy levemente, siendo posible realizar cálculo diferencial para realizar su análisis.

2.1.3 CINEMÁTICA DE FLUIDOS. DESCRIPCIONES EULERIANA Y LAGRANGIANA.¹⁵

La cinemática de fluidos describe el movimiento de los mismos, sin considerar las causas que lo provocan (fuerzas y momentos).

La descripción Lagrangiana (Joseph Lagrange, 1736 - 1813) describe la trayectoria de cada partícula del fluido por separado, esto quiere decir que se sigue el rastro del vector posición (X) y vector velocidad (V) de cada partícula como funciones del tiempo (t). Esta descripción es válida para Mecánica de Sólidos ya que no se pueden identificar con facilidad las partículas de un fluido según como estas se desplacen en todas las direcciones.

FIGURA No. 2. 3: DESCRIPCIÓN LAGRANGIANA.



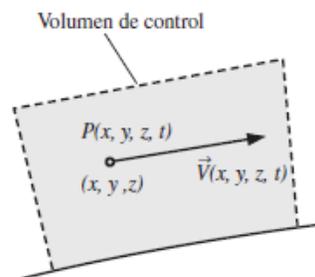
FUENTE: Cengel, Y. & Cimbala, J. (2006). *Descripciones Lagrangiana y Euleriana*. En *Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones*. (pp.122-123). México D.F.: Mc Graw Hill.

En la descripción Euleriana (Leonhard Euler, 1707 – 1783) “Se define un volumen finito, denominado dominio del flujo o volumen de control a través del cual un fluido fluye hacia adentro y hacia afuera”. [7] (Cengel & Cimbala, 2012)

¹⁵ Cengel, Y., & Cimbala, J. (2006). *Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones*. México, D.F.: McGraw Hill.

En esta descripción no se sigue la posición o velocidad de una masa de partículas fijas del fluido, sino que se definen variables de campo en función del espacio y tiempo dentro del volumen de control, como el campo de presión (variable escalar), campo de velocidad (variable vectorial) y campo de aceleración (variable vectorial), donde estos campos de manera colectiva forman el campo de flujo.

FIGURA No. 2. 4: DESCRIPCIÓN EULERIANA (EN CUALQUIER LUGAR Y EN CUALQUIER INSTANTE).



FUENTE: Cengel, Y. & Cimbala, J. (2006). *Descripciones Lagrangiana y Euleriana*. En *Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones*. (pp.122-123). México D.F.: Mc Graw Hill.

Para la descripción del flujo de fluidos, el método común usado es la descripción Euleriana, donde para rastrear a las partículas individuales se definen variables de campo que son función del espacio y tiempo dentro de un volumen de control.

FIGURA No. 2. 5: VARIABLES QUE DEFINEN EL CAMPO DE FLUJO.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FUENTE: Material digital y apuntes de la materia Hidrodinámica.

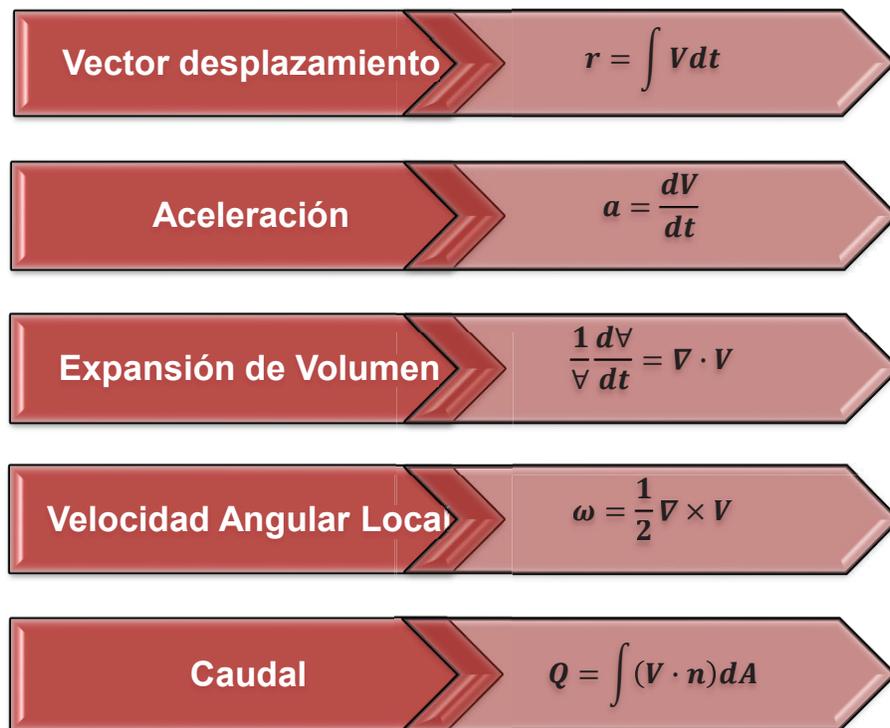
2.1.4 CAMPO DE FLUJO.

Campo de Velocidades¹⁶.- La velocidad es una variable vectorial que está en función del tiempo (t) y de la posición (x, y, z), la cual tiene tres variables escalares u, v y w , Ec. (2.1).

$$V(x, y, z, t) = \vec{i}u(x, y, z, t) + \vec{j}v(x, y, z, t) + \vec{k}w(x, y, z, t) \quad (2.1)$$

Es una de las propiedades más importantes del flujo, ya que a través de esta se puede determinar otras propiedades que dependen directamente de la velocidad.

FIGURA No. 2. 6: PROPIEDADES CINEMÁTICAS DE LOS FLUIDOS QUE DEPENDE DE LA VELOCIDAD.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FUENTE: Material digital y apuntes de la materia Hidrodinámica.

¹⁶ White, F. (2004). Mecánica de Fluidos. España.: McGraw Hill.

Siendo la velocidad una propiedad importante de flujo, tiene interacción con las propiedades del fluido, como la presión, la densidad y la temperatura (las tres de mayor interacción con la velocidad). Si en el análisis intervienen parámetros de trabajo, calor y balance de energía (equilibrio energético), intervienen cuatro propiedades importantes, Energía Interna, Entalpía, Entropía y Calor Específico. Así también tienen dependencia de la velocidad los coeficientes de transporte (efecto de la fricción y conducción), el coeficiente de viscosidad y la conductividad térmica.

Campo de Aceleraciones¹⁷.- Dentro de la Mecánica de Fluidos, la aceleración se considera un parámetro fundamental, que aparece aplicando la Segunda Ley de Newton en un sistema fluido infinitesimal, por lo que es necesario calcular la derivada total del vector velocidad Ec. (2.2) en función del tiempo.

$$a = \frac{dV}{dt} = i \frac{du}{dt} + j \frac{dv}{dt} + k \frac{dw}{dt} \quad (2.2)$$

Se derivan los valores de u , v , w (en x , y , z) respecto al tiempo.

$$\frac{du}{dt} = \frac{du}{dt} + u \frac{du}{dx} + v \frac{dv}{dy} + w \frac{dw}{dz} = \frac{du}{dt} + (V \cdot \nabla)V \quad (2.3)$$

De igual manera se realiza el mismo procedimiento que la Ec. (2.3) para v y w , de este modo obtener la ecuación de la aceleración Ec. (2.4).

$$a = \frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dt} + \left(u \frac{\partial V}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial y} + w \frac{\partial V}{\partial z} \right) = \frac{dV}{dt} + (V \cdot \nabla)V \quad (2.4)$$

Donde:

$\frac{dV}{dt}$, Aceleración Local: Su variación tiene relación con flujo estacionario o permanente.

¹⁷ White, F. (2004). Mecánica de Fluidos. España.: McGraw Hill.

$(V \cdot \nabla)V$, Aceleración Convectiva: Su variación se da con el movimiento del flujo de una región respecto a otra región.

Campo de Presiones. - Con la Descripción Euleriana es posible determinar el campo de presiones $p(x, y, z, t)$ en un instante de tiempo para el flujo, más no los cambios en la presión $p(t)$ que experimenta una partícula en su trayectoria.

2.2 SISTEMA Y VOLUMEN DE CONTROL.

Sistema¹⁸.- Es una masa de materia definida en el espacio para su estudio, ya que las leyes de la mecánica están planteadas para un sistema. Se conoce como **alrededores** a la región que se ubica fuera del sistema y **frontera** a la superficie real o imaginaria que separa el sistema de los alrededores, esta puede ser fija o móvil y no ocupa volumen espacial alguno siendo su espesor cero.

FIGURA No. 2. 7: MASA DE MATERIA DEFINIDA EN EL ESPACIO (SISTEMA).



FUENTE: Cengel, Y. & Cimbala, J. (2006). *Descripciones Lagrangiana y Euleriana*. En *Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones*. (p.14). México D.F.: Mc Graw Hill.

Los principios o leyes de la mecánica:

- Conservación de la masa.
- Cantidad de movimiento lineal y cantidad de movimiento angular.
- Ecuación de energía.

¹⁸ Cengel, Y., & Cimbala, J. (2006). *Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones*. México, D.F.: McGraw Hill.

Se aplican a una masa de materia definida, la cual, al cambiar de forma, posición y temperatura, siempre mantendrá su misma cantidad de materia.¹⁹

Volumen de Control. - El volumen de control tiene tamaño y forma fija en el espacio, es decir sus fronteras son fijas. La cantidad de materia puede variar en el tiempo, pero mantendrá constante su forma.

El volumen de control es muy útil para el análisis en Mecánica de Fluidos.

FIGURA No. 2. 8: DESCRIPCIÓN DE SISTEMA.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FUENTE: Material digital y apuntes de la materia Hidrodinámica.

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} n\rho dV + \int_{SC} n\rho V dA \quad (2.5)$$

Donde N es la cantidad total de alguna propiedad (masa, energía, cantidad de movimiento) dentro de un sistema en el tiempo t, y n es la cantidad de esta propiedad por unidad de masa, en todo el fluido.

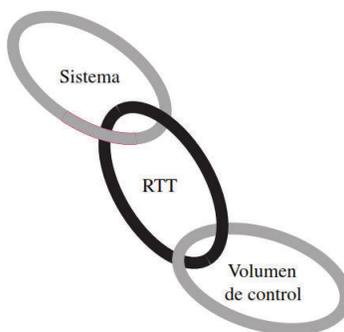
¹⁹ Ortega P. (2015). Simulación numérica de una estructura separadora de caudales con metodología CFD, aplicando el paquete computacional ANSYS CFX 15.0, Tesis de E.P.N. Directora Ing. M.SC. Ximena Hidalgo, Quito, Ecuador.

2.3 ECUACIONES DEL TRANSPORTE DE REYNOLDS.²⁰

En mecánica de fluidos se caracteriza por describir; el movimiento y las ecuaciones de los fluidos que se los obtiene de los procesos que están asociados a los movimientos de los fluidos como; conservación de masa, cantidad de movimiento y energía.

El teorema permite relacionar las variaciones de las cantidades extensivas B o su correspondiente propiedad intensiva b referidas al sistema con el balance de dicha cantidad en el volumen de control fijo y arbitrario de esta manera realiza la transformación de sistema a volumen de control.

FIGURA No. 2. 9: TEOREMA DE TRANSPORTE DE REYNOLDS.



FUENTE: Cengel, Y. & Cimbala, J. (2006). *El Teorema de Transporte de Reynolds*. En *Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones*. (pp.148-149). México D.F.: Mc Graw Hill.

La siguiente Ec. (2.6) expresa la variación del sistema B_{sist} en un volumen de control a partir del principio de conservación.

RTT, VC fijo:

$$\frac{dB_{sist}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{VC} \rho b dV + \int_{SC} \rho b \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (2.6)$$

²⁰ Cengel, Y., & Cimbala, J. (2006). *Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones*. México, D.F.: McGraw Hill.

2.4 ECUACIONES BÁSICAS DEL MOVIMIENTO.

En la Mecánica de fluidos se presenta el interés de analizar algunos aspectos importantes de los fluidos, generalmente fenómenos de transferencia y capacidad de los fluidos en movimiento de transportar materiales de un lugar a otro y de igual manera estudiar sus propiedades. Estos procesos fundamentales de transferencia están asociados al movimiento que realiza los fluidos, tales como²¹:

- Conservación de masa (Principio de continuidad).
- Conservación de la cantidad de movimiento (Segunda Ley de Newton).
- Conservación de la energía (Primera ley de la Termodinámica).

La conservación de las propiedades más importantes que se encuentran presentes en un fluido dentro de un volumen de control se representan como el equilibrio entre varios procesos de variación.

Las ecuaciones fundamentales que rigen en mecánica de fluidos se las pueden expresar de manera integral y diferencial.²²

El análisis diferencial se utiliza para una partícula de fluido que está ocupando en un instante una posición determinada dentro de un volumen de control. Estas ecuaciones brindan la manera de analizar las diferentes características y comportamiento del flujo, debido que se busca resolver el movimiento de las partículas de fluido en el volumen de control para dicho instante.

El análisis integral frente al análisis diferencial, no proporciona una descripción detallada del flujo debido que sus ecuaciones relacionan magnitudes e integrales tales como: masa, cantidad de movimiento y energía que hay en un instante dentro de un volumen de control y por este motivo su aplicación es más sencilla que el análisis diferencial.

²¹ Daily, J., & Harleman, D. (1975). *Dinámica de los Fluidos con aplicaciones en la Ingeniería*. México.: Trillas.

²² Rivas, A. (2007). *Análisis diferencial de flujos*. (TECNUN).

2.4.1 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD.

El principio de conservación de masa es el principio fundamental de la naturaleza en la Mecánica de Fluidos para volúmenes de control se considera que la razón de cambio de masa que entra y sale del volumen de control no varía como se puede observar en las siguientes ecuaciones.

$$\frac{dM_{sistema}}{dt} = 0 \quad (2.7)$$

$$m_{sale} = m_{entra} \quad (2.8)$$

La masa por unidad de tiempo que pasa por la superficie de entrada es igual a la que atraviesa la superficie de salida en un volumen de control.

Para un volumen de control (VC) el balance de masa se expresa en la siguiente Ec. (2.9).

$$m_{entra} - m_{sale} = \frac{dm_{VC}}{dt} \quad (2.9)$$

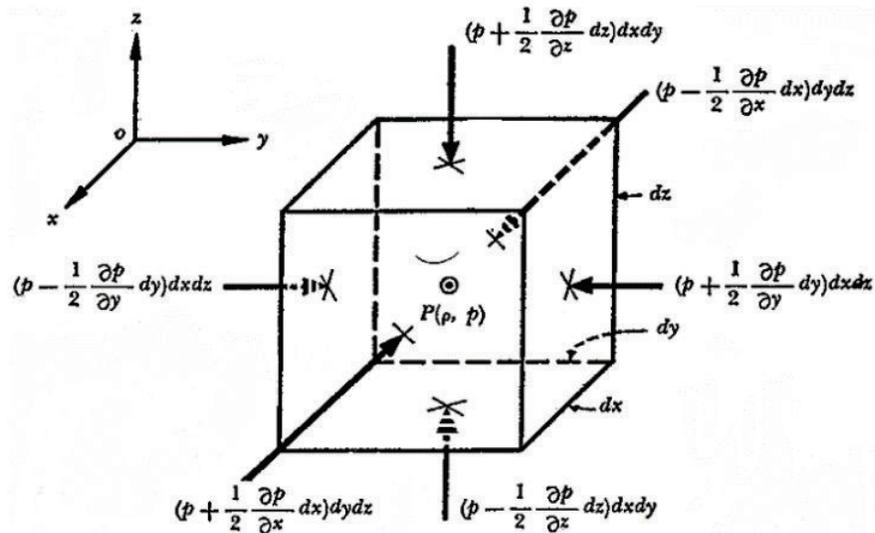
Este principio para un *volumen de control* se puede expresar como: La transferencia neta de masa hacia dentro de un volumen de control o hacia fuera de este durante un intervalo de tiempo Δt es igual al cambio neto (aumento o disminución) en la masa total que está dentro de ese volumen en transcurso de Δt . (Cengel Y. ..., 2006).

La hipótesis del medio continuo “*considera que el fluido es continuo a lo largo del espacio que ocupa*”; permite expresar el principio de continuidad en forma de ecuaciones diferenciales.

Para la deducción de la ecuación de la continuidad se considera un elemento infinitesimal establecido por longitudes dx , dy , dz paralelos a los ejes coordenados x , y , z de tal manera que en el centroide de la Figura No. 2. 10 se tenga la densidad

ρ y presión p . En las caras del elemento se muestra el incremento de la presión en magnitudes diferenciales generando las fuerzas indicadas.

FIGURA No. 2. 10: EQUILIBRIO DE UNA PARTICULA EN REPOSO.



FUENTE: Sotelo, G. (1997). Hidrostática y Ecuaciones Fundamentales. Hidráulica General Vol.1. (p.39). México D.F. Limusa.

Obteniendo:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2.10)$$

La Ec. (2.11) diferencial de la conservación de masa expresa de la siguiente manera.

$$\frac{d(\rho)}{dt} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) \quad (2.11)$$

Ecuación Integral de la conservación de masa:

$$\frac{d}{dt} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = 0 \quad (2.12)$$

2.4.2 ECUACIÓN DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO.

2.4.2.1 ECUACIÓN DE EULER.

Según Leonhard Euler (1707-1783)), basado en las ecuaciones de Bernoulli (1700-1782) formula un conjunto de ecuaciones cuyas soluciones describen el movimiento de un fluido hipotético no viscoso. Para la ecuación de Euler se considera un elemento infinitesimal de lados dx , dy , dz como se observa en la FIGURA No. 2. 10, donde la densidad es ρ y la presión p para un sistema de coordenadas x , y , z de tal manera que la presión se incrementa en magnitudes diferenciales.

Al hacer equilibrio de fuerzas en la dirección x se obtiene la siguiente expresión:

$$\left(-\frac{\partial p}{\partial x} + \rho X \right) = \rho \frac{du}{dt} \quad (2. 13)$$

Al hacer equilibrio de fuerzas, simplificaciones e idénticos razonamientos como para la dirección x se obtiene las ecuaciones para las direcciones y , z .

$$-\frac{\partial p}{\partial y} + \rho Y = \rho \frac{dv}{dt} \quad (2. 14)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} + \rho Z = \rho \frac{dw}{dt} \quad (2. 15)$$

Para un cuerpo rígido de masa m , la segunda ley de Newton se expresa para sus respectivos componentes Ec. (2.16):

$$\left. \begin{aligned} \Sigma F_x &= ma_x = m \frac{du}{dt} \\ \Sigma F_y &= ma_y = m \frac{dv}{dt} \\ \Sigma F_z &= ma_z = m \frac{dw}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (2. 16)$$

Para obtener la ecuación de Euler en las tres dimensiones se desprecia el efecto viscoso únicamente se considera las velocidades y presiones. De tal manera que al igualar las ecuaciones para cada componente se obtiene las ecuaciones de Euler Ec. (2.17).

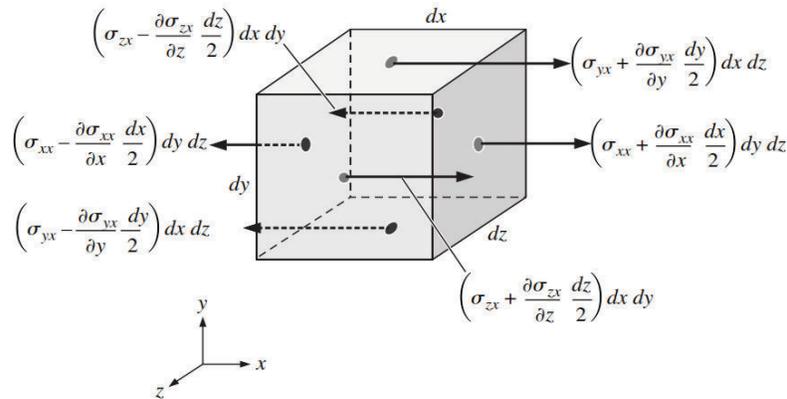
$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= X - \left(\frac{du}{dx} u + \frac{du}{dy} v + \frac{du}{dz} + \frac{du}{dt} \right) \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} &= Y - \left(\frac{dv}{dx} u + \frac{dv}{dy} v + \frac{dv}{dz} + \frac{dv}{dt} \right) \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} &= Z - \left(\frac{dw}{dx} u + \frac{dw}{dy} v + \frac{dw}{dz} + \frac{dw}{dt} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.17)$$

2.4.2.2 ECUACIONES DE NAVIER-STOKES.

El científico Claude Navier (1785-1836), en 1822 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 que 20 años atrás había obtenido Claude Navier.

FIGURA No. 2. 11: FUERZAS SUPERFICIALES QUE ACTÚAN EN LA DIRECCIÓN DEBIDO AL TENSOR ESFUERZO APLICADO A UN VOLUMEN DE CONTROL.



FUENTE: Cengel, Y. & Cimbala, J. (2006). *Deducción con el uso de un volumen de control infinitesimal*. En *Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones*. (pp.422-424). México D.F.: Mc Graw Hill.

2.4.3 LEY DE VISCOSIDAD DE STOKES.

Para fluidos newtonianos el esfuerzo cortante τ está limitado a flujos laminares y que se muevan en líneas paralelas:

$$\tau = \mu \frac{\partial V}{\partial n} \quad (2.18)$$

Donde:

n : es la dirección coordenada perpendicular a la interfaz.

μ : es el coeficiente de viscosidad.

La ley de viscosidad de Stokes se obtiene realizando cambios en el módulo de elasticidad tangencial por el coeficiente de viscosidad y la deformación lineal, el ángulo de corte por las velocidades lineales y velocidades de variación del ángulo de corte, estos cambios se han realizado comprobaciones experimentales en fluidos newtonianos.

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy} \quad (2. 19)$$

$$\tau_{xy} = \mu \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial t} \quad (2. 20)$$

$$\left. \begin{aligned} \tau_{xy} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \tau_{yz} &= \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \tau_{xz} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2. 21)$$

Donde las Ec. (2. 21) representan las tensiones tangenciales al flujo.

Las leyes de Newton son ecuaciones que relacionan los movimientos de los cuerpos y las fuerzas que actúan sobre los volúmenes de control como se observa en la Ec. (2. 22).

$$\Sigma F_{total} = (\Sigma F_{gravedad})_{cuerpo} + (\Sigma F_{presion} + \Sigma F_{viscosa} + \Sigma F_{otra})_{superficiales} \quad (2. 22)$$

- Fuerzas de cuerpo (peso propio).
- Fuerzas superficiales (externas).

Al considerar la ley de la dinámica, para un volumen infinitesimal se expresa de la siguiente manera:

$$\Sigma F_{cuerpo} = \Sigma F_{gravedad} = \rho g_x dx dy dz \quad (2. 23)$$

$$\Sigma F_{x,\text{superficie}} = \left(\frac{\partial}{\partial x}(\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{yx}) + \frac{\partial}{\partial z}(\tau_{zx}) \right) \quad (2.24)$$

$$\tau_{xx} = 2\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad \tau_{yy} = 2\mu \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad \tau_{zz} = 2\mu \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (2.25)$$

Donde las Ec. (2.25) representan las tensiones normales al flujo y μ la viscosidad.

Para la deducción de la ecuación, se asume un flujo incomprensible ($\rho = \text{cte}$) y propiedades de fluido como:

Ecuación de Navier Stokes para fluidos incomprensibles en coordenadas cartesianas para las componentes (x, y, z) .

$$\left. \begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial z}{\partial t} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.26)$$

Donde:

$$\left. \begin{aligned} g_x &= -g \frac{\partial h}{\partial x} \\ g_y &= -g \frac{\partial h}{\partial y} \\ g_z &= -g \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

2.4.4 ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE ENERGÍA.²³

La primera ley de la termodinámica para un sistema menciona, que la variación de la energía de un sistema se debe al trabajo de las fuerzas que actúan sobre él y al calor intercambiado con el exterior y generado por el sistema.

$$dQ - dW = dE \quad (2. 28)$$

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} = \frac{dE}{dt} \quad (2. 29)$$

La energía interna por unidad de masa se llama e ; aplicando la ecuación (2.5) y reemplazando $N = E$ y $n = \frac{\rho e}{\rho}$.

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho e dV + \int_{SC} \rho e v dA \quad (2. 30)$$

Al reemplazar en la ecuación (2. 30), se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} = \frac{dE}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho e dV + \int_{SC} \rho e v dA \quad (2. 31)$$

El trabajo mecánico (w_p) realizado por las fuerzas de presión sobre las fronteras en movimiento y el trabajo de deformación por esfuerzos viscosos se genera por las fuerzas cortantes como el par torsional ejercido sobre un eje en rotación.

$$dW_p = \partial t \int_{SC} \rho (V \cdot n) dA \quad (2. 32)$$

$$dW_v = - \int_{SC} \tau_v V dA \quad (2. 33)$$

²³ Streeter, V. L. (1987). Mecanica de Fluidos. Mexico: McGraw-Hill.

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dW_s}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} \rho e dV + \int_{sc} \left(\frac{\rho}{\rho} + e \right) \rho v dA \quad (2.34)$$

2.5 INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS DE TURBULENCIA.²⁴

La turbulencia está asociada al movimiento tridimensional irregular y caótico de torbellinos de distintos tamaños que se producen en el flujo principal del fluido, la turbulencia se presenta en un fluido por los cambios de gradientes de velocidad que son inestables y dan lugar a que se presenten muchas escalas fluctuantes aparentemente aleatorias.

La turbulencia es un tema de estudio muy importante en el campo de la Hidráulica, debido a su complejidad no existe un modelo que pueda representar todos los flujos turbulentos. Según Valderrama, (2003) *“los modelos de turbulencia deben ser considerados como correlaciones de ingeniería o aproximaciones para que la interpretación permita obtener modelos afinados para aspectos particulares que puedan provenir de flujos turbulentos”*.

Para números de Reynolds bajos se presentan escalas pequeñas y velocidades bajas para el movimiento de fluidos viscosos; mientras que para números de Reynolds altos se presentan flujos turbulentos, debido a que las fuerzas de inercia del fluido llegan a ser significativas comparadas con las fuerzas viscosas.

2.5.1 CASCADA DE ENERGÍA.

La presencia de turbulencia en el flujo, da lugar a que los vórtices de mayor tamaño interactúen con el flujo principal produciendo el intercambio de energía cinética turbulenta k de los vórtices más grandes hacia los vórtices más pequeños. El tamaño o escala de los vórtices se los compara con la escala del flujo. Los vórtices al ser inestables por efectos de la interacción entre ellos tienden a dividirse en

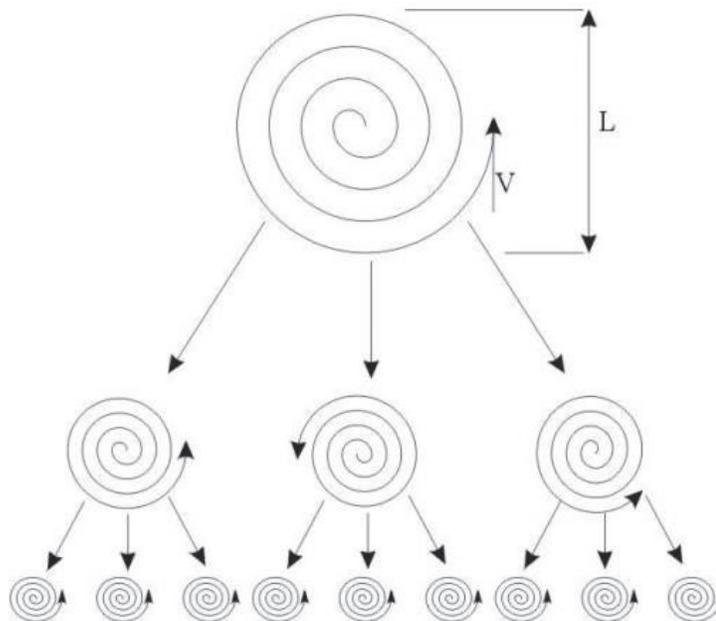
²⁴ Carrillo J. (2014). Metodología numérica y experimental para el diseño de los cuencos de disipación en el sobrevuerto de presas de fábrica., Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Cartagena.

vórtices más pequeños; este proceso de división se produce en cascada y al tener diferentes escalas en el movimiento turbulento.

El fenómeno de turbulencia posee una característica adicional, es que se presenta en 4 dimensiones (3 dimensiones en el espacio y una en el tiempo) debido que la turbulencia genera vórtices aleatoriamente y no son capaces de mantener en flujo bidimensional.

El proceso de división es continuo hasta que los vórtices sean muy pequeños y el número de Reynolds de los mismos no sea muy grande para que la inestabilidad se mantenga. Este proceso de intercambio de energía cinética contenida en los vórtices se transforma a energía térmica por efecto de la disipación viscosa se lo conoce como cascada de energía.

FIGURA No. 2. 12: CASCADA DE ENERGÍA (Escala de Turbulencia).



FUENTE: Redondo, J. (2013). *Características de la turbulencia*. En Applied Physics and Scientific Simulation.

2.5.2 ESCALAS DE TURBULENCIA.²⁵

2.5.2.1 EDDYS TURBULENTOS Y ESCALAS DE ENERGÍA.

Un Eddy o vórtices se lo define como un elemento de fluido microscópico en el cual los elementos que lo componen se comportan de algún modo como unidad y se mueven a lo largo de la turbulencia²⁶. Un ejemplo de Eddy es un vórtice en un flujo, sin embargo, en un flujo simple hay eddys de diferentes tamaños; siendo característica de flujo turbulento la existencia de un gran número de eddys. Mientras más grande el número de Reynolds más amplio es el rango de tamaños de eddys.

En todo flujo turbulento se presentan un sinnúmero de variedades en vórtices de diferentes escalas, estas escalas se agrupan en tres principales que son las siguientes:

1. Macroescala.
2. Escalas intermedias.
3. Microescala.

Macroescala: es la escala de mayor tamaño posible en un Eddy, se asocia a los vórtices más grandes y el número de Reynolds asociado al flujo será el mismo que el flujo principal. Las características de los vórtices dependen de las condiciones de contorno del flujo y presentan un carácter anisótropo (dependientes de la dirección). Esta escala es usada generalmente para establecer el número de Reynolds principal definido por la vorticidad promedio.

Escala intermedia: posee el mismo orden de magnitud de la Macroescala, y representa el tamaño promedio de las escalas de eddys de mayor tamaño en flujo turbulento. Son escalas inferiores a la Macroescala. En este tipo de escalas aún no se produce la disipación de energía debido que reciben energía de la escala superior Macroescala, Taylor y Kolmogorov.

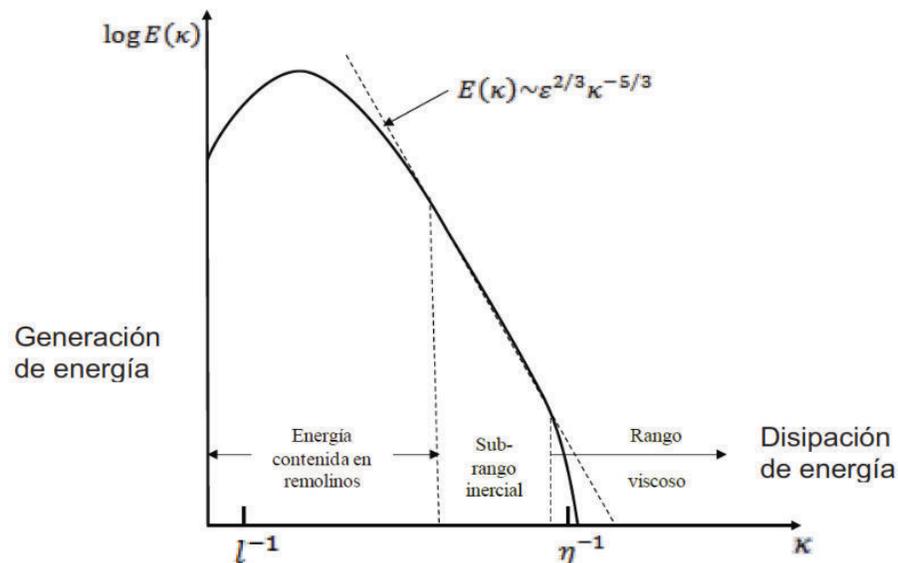
²⁵ Rangel, L. O. (2005). Efectos de la presión sobre Jet Confinado a una cámara de combustión. Sertenejas: Proyecto de Pregrado.

²⁶ Turns, S.R. An Introduction to Combustion 2000.

La escala de Taylor l_λ es una escala intermedia entre l_o y l_k , en la escala de Kolmogorov.

Microescala: es la escala más pequeña en turbulencia, se caracteriza por un número de Reynolds donde los términos de convección y difusión son importantes. Físicamente se produce disipación de energía en calor de las escalas más pequeñas hacia las más grandes produciendo rompimientos. Al contrario de la macroescala, son donde los torbellinos presentan un carácter isótropo (no son dependientes de la dirección).

FIGURA No. 2. 13: ESPECTRO DE ENERGIA TURBULENTA.

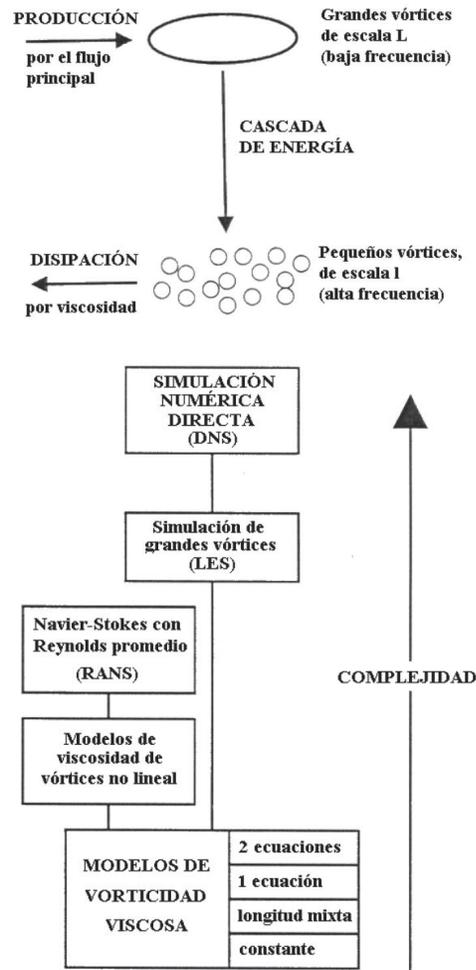


FUENTE: Carrillo J. (2010-2012). *Descripción espectral y Ley -5/3 de Kolmogorov*. En Programa de Doctorado: Medio Ambiente y Minería Sostenible. (pp. 41-43). Cartagena.

2.5.3 MODELOS DE TURBULENCIA.

Para fluidos laminares o no viscosos no es muy compleja la solución de las ecuaciones que gobiernan el flujo, sin embargo, para flujos turbulentos es muy complejo la resolución de las ecuaciones que intervienen. Para entender de mejor manera los efectos de la turbulencia en el transcurso de los años se han realizado muchas investigaciones para encontrar modelos de turbulencia.

FIGURA No. 2. 14: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE TURBULENCIA.



FUENTE: Ballesteros R. (2004-2005), Turbulencia, Universidad de Oviedo.

2.5.4 SIMULACIÓN NUMÉRICA DIRECTA (Direct Numerical Simulation, DNS).

La simulación numérica directa es un modelo de turbulencia que mediante la resolución directa de las ecuaciones de Navier-Stokes representa la turbulencia. Para emplear este método se requiere el uso de mallas finas para resolver todas las escalas de turbulencia. Por esta razón la DNS se puede emplear únicamente en flujos canónicos y es bueno para modelos Hidráulicos con números de Reynolds bajos y de geometrías simples. Este modelo resuelve todas las escalas espaciales y temporales del flujo turbulento sin promedios o aproximaciones.

2.5.5 SIMULACIÓN DE GRANDES VÓRTICES (Large Eddy Simulation, LES).

La idea principal de este modelo es la simulación numérica del flujo turbulento que depende del tiempo y que posee elevados números de Reynolds por lo que se requiere mallas extremadamente finas. El nivel de complejidad implica un costo computacional muy elevado, debido que las mallas deben ser muy refinadas, dando lugar a que aparezca como alternativa más económica Large Eddy Simulation (LES) comparado con el Direct Numerical Simulation (DNS) por motivo de las limitaciones computacionales.

El modelo Large Eddy Simulation (LES) fue desarrollado en base a la observación de que las pequeñas escalas de turbulencia poseen un carácter universal en comparación de las grandes. La finalidad de este modelo es resolver de mejor manera las escalas grandes de turbulencia y aproximar el efecto de pequeñas escalas.

2.5.6 SIMULACION RANS (Reynolds Averaged Stokes).

El modelo de simulación (Reynolds Averaged Stokes, RANS) es método estadístico basado en el promedio de Reynolds y de las ecuaciones de Navier-Stokes. Está basada en la descomposición de las variables de flujo en un valor medio y otro fluctuante.

Son conocidos como los modelos de turbulencia estadísticos, debido que en la resolución de estas ecuaciones se realizan por promedios estadísticos.

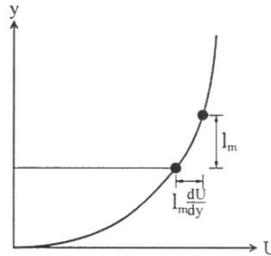
2.5.7 LONGITUD DE MEZCLA DE PRANDTL.

La hipótesis de longitud de mezcla fue enunciada por Ludwig Prandtl (1875-1953) para capas límites bidimensionales y representa la distancia media recorrida que hacen las partículas perpendiculares al flujo a lo largo del cual una partícula pierde su cantidad de movimiento y energía extra que posee. Este modelo está basado en

la premisa de un torbellino turbulento que desplaza a una partícula fluida una distancia l_m .

$$v_t = l_m^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| \quad (2.35)$$

FIGURA No. 2. 15: MODELO DE LONGITUD MIXTA l_m .



FUENTE: Ballesteros R. (2004-2005), Turbulencia, Universidad de Oviedo.

Donde:

l_m = es la longitud de mezcla y depende del tipo de flujo.

Ventajas:

- Fácil implementación.
- Proporciona una buena predicción de chorros

Desventajas:

- No describe flujos con separación o recirculación.
- Calcula únicamente propiedades medias y tensiones turbulentas.

2.5.8 MODELO DE DOS ECUACIONES $k - \epsilon$ (k - epsilon).

El modelo $k - \epsilon$ o $k - \epsilon$ pretende corregir los errores del modelo de mezcla de Prandtl y permite calcular flujos con separación o recirculación; flujos en rotación; flujos con cambios repentinos en la velocidad media de deformación y flujos en superficies curvas. Fue desarrollado por Harlow y Nakayama en 1968; Launder y Sharma en 1974. Por tener mayor campo de aplicación se le considera un

modelo estándar y se construye en uno de los más empleados en los códigos de CFD debido que es estable, robusto y presenta buena capacidad de predicción.

El modelo de turbulencia k-ε es un modelo semiempírico del modelo de turbulencia RANS, estos modelan el fenómeno de la turbulencia a través de dos ecuaciones.

La de energía cinética turbulenta (k) Ec. (2.36) y la de disipación de energía cinética turbulenta (ε) Ec. (2.37). Según (Malalasekera, 1995) este es uno de los modelos más utilizados en el campo ingenieril en flujos confinados para valores de Reynolds y velocidades altas, son dominantes en flujos alejado de la pared. Una de las desventajas de este modelo es que no es muy eficiente en condiciones cercanas a la pared como la capa límite, se lo conoce como el modelo k-ε estándar, los coeficientes del modelo fueron ajustados por (Sharma B., 1974)

Energía cinética turbulenta (k).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} (\tau_{ij}) - \rho \epsilon \quad (2.36)$$

Disipación de energía cinética turbulenta (ε).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} (\tau_{ij}) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - C_{\epsilon 2} \left(\rho \frac{\epsilon^2}{k} \right) \quad (2.37)$$

Donde:

G_k , representa la generación de energía cinética turbulenta por acción gradiente de velocidad.

G_b , representa la generación de energía cinética turbulenta por acción a las fuerzas de flotación.

μ_t , es la viscosidad turbulenta constante.

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

Para las constantes:

$$C_\mu = 0.09$$

$$C_{1\varepsilon} = 1.44$$

$$C_{2\varepsilon} = 1.92$$

$$\sigma_\varepsilon = 1.3$$

$$\sigma_k = 1.0$$

2.5.9 MODELO DE DOS ECUACIONES k - omega (k- ω).

El modelo de turbulencia (k- ω), es un modelo empírico de dos ecuaciones, este modelo representa mejor la turbulencia en lugares cercanos a contornos sólidos en especial en capas límites, debido que tiene una ecuación para modelar la energía cinética turbulenta (k) Ec. (2.39) y la tasa específica de disipación viscosa omega (ω) Ec. (2.40) que corresponde a “la razón de cambio de energía por unidad de volumen y tiempo Wilcox, (1998). Posee un excelente comportamiento cerca de las paredes y un excelente modelo para simular flujos en la capa límite y subcapa viscosa.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial k}{\partial x_j}(\rho u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} (\tau_{ij}) - \beta^* \rho k \omega \quad (2.39)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial \omega}{\partial x_j}(\rho u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 \quad (2.40)$$

Donde:

$$\mu_t = \rho \frac{k^2}{\omega} \quad (2.41)$$

Para las constantes:

$$\alpha = \frac{5}{9}$$

$$\beta^* = \frac{9}{100}$$

$$\beta = \frac{3}{4}$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{2}$$

$$\sigma_k = \frac{1}{2}$$

2.5.10 MODELO DE TENSIÓN DE REYNOLDS (Reynolds Stress Model, RSM).

Este modelo fue desarrollado por Launder, 1975 con el fin de corregir las deficiencias del modelo $k - \varepsilon$, el cual establece una ecuación referencial para cada tensión de Reynolds modelizando los términos de producción, difusión, transporte y rotación. Este modelo presenta deficiencia para la simulación de problemas con capa límite.

Al ser modelos físicamente más complejos se utilizan en la simulación de flujo con fuerte anisotropía, cambios bruscos de velocidad de deformación y flujos generados por la gravedad.

Ventajas:

- Es un modelo más general que los anteriores.
- Puede simular flujos que en algunos modelos no son posibles hacerlo tales como: chorros, conductos no circulares y flujos con mucha curvatura.

Desventajas:

- No son muy eficientes al simular flujos asimétricos y flujos no confinados.

2.5.11 MODELOS DE TENSIONES ALGEBRAICAS (Algebraic Stress Model, ASM).

Este modelo fue desarrollado por Rodi en 1982, se eliminan o se modelizan los términos de convección y difusión que supone un esfuerzo de cálculo y toma en cuenta la anisotropía de estas tensiones.

Ventajas:

- Toman en cuenta la anisotropía de las tensiones de Reynolds.
- Combina las generalidades del modelo RMS y con el menor coste del modelo $k - \varepsilon$.
- Buenos resultados en capas de cortadura.

2.6 NÚMEROS ADIMENSIONALES PARA CLASIFICAR A LOS FLUJOS.

La caracterización de flujos en canales se realiza por medio de los números adimensionales de Reynolds, Froude y Vedernikov, los cuales sirven para clasificar y determinar el régimen del flujo.

Número de Reynolds (Osborne Reynolds, 1882).- Es un número adimensional que relaciona fuerzas de inercia y fuerzas de viscosidad, donde valores de Reynolds pequeños ($Re < 500$) describe a un flujo laminar, valores de Reynolds intermedios ($500 < Re < 2000$) describe a un flujo en transición, mientras que valores de Reynolds altos ($Re > 2000$) describe a un flujo turbulento.

$$Re = \frac{VL\rho}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (2.42)$$

Donde:

V: Velocidad característica [m/s].

L : Longitud característica [m]. Para el caso de tuberías D (diámetro, [m]) reemplaza a L .

ρ : Densidad [kg/m^3].

μ : Viscosidad del fluido. [kg/ms].

ν : Viscosidad cinemática. [m^2/s].

Número de Froude (William Froude).- Es un número adimensional que relaciona fuerzas de inercia y fuerzas de gravedad. Este número es fundamental para definir el régimen de un fluido que circula a superficie libre. A través de este número se puede clasificar al flujo en subcrítico si $Fr < 1$, flujo supercrítico si $Fr > 1$, y si $Fr = 1$ se denomina flujo crítico.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{Lg}} \quad (2.43)$$

Donde:

v : Velocidad característica [m/s].

L : Longitud característica [m].

g : Constante gravitacional [m/s^2].

Número de Vedernikov (Chow 1983 & Ponce 1979).- Es un número adimensional que relaciona la velocidad relativa de la onda cinemática y la velocidad de la onda dinámica. Define la condición del flujo de acuerdo a la estabilidad de la superficie libre, como estable, neutral o inestable.

Según Chow (1959), la ecuación básica se define como:

$$V = \chi \cdot \gamma \cdot Fr \quad (2.44)$$

Dónde:

χ : Parámetro de la fricción de borde.

γ : Parámetro de forma de la sección transversal.

Fr: Número de Froude.

Según Chow (1983) & Ponce (1979), la ecuación que relaciona las velocidades de onda se expresa como:

$$V = \frac{V_k}{V_d} \quad (2.45)$$

Dónde:

V_k : Velocidad relativa de onda cinemática.

V_d : Velocidad relativa de onda dinámica.

Si:	$V_k < V_d$	$V < 1$	—————>	Flujo Estable
Si:	$V_k > V_d$	$V > 1$	—————>	Flujo Inestable
Si:	$V_k = V_d$	$V = 1$	—————>	Neutralmente estable

2.7 GENERALIDADES SOBRE RÁPIDAS O CANALES DE PENDIENTE FUERTE.

Canales de fuerte pendiente (Rápidas).- Son estructuras hidráulicas que sirven de empate de dos tramos de un canal, donde la diferencia de cotas (desnivel) es considerable. Se diseñan con la finalidad de aumentar el grado de disipación de energía en los flujos de velocidades altas. Como objetivo se desea disminuir la velocidad del flujo y pasar de un régimen supercrítico a régimen subcrítico para estabilizar el flujo.

Este tipo de estructuras están compuestas por la estructura de entrada, el tramo inclinado, el dissipador de energía y la estructura de salida.

La estructura de entrada o sección de control, es la que se encarga de realizar la transición del flujo desde el canal aguas arriba hacia el tramo inclinado. En esta sección está el cambio en la pendiente del fondo de suave a fuerte produciéndose el tirante crítico. La estructura de entrada tiene como objetivos:

- Impedir que el volumen de agua circulante se acelere.
- Regular el paso del flujo para evitar erosión en la rápida.
- Prevenir la formación de ondas a lo largo del tramo inclinado.

El tramo inclinado cumple la función de conducir el flujo desde una superficie de cota mayor a otra de menor cota. Trata de seguir la superficie natural de terreno a través de una sección prismática. La presente investigación hará énfasis en esta parte de la estructura, ya que se desea aprovechar el tramo inclinado para contribuir a aumentar la disipación de energía, reduciendo la velocidad del flujo cambiando la rugosidad en el fondo del canal.

Al pie del canal de pendiente fuerte se construye una estructura disipadora, que puede ser dentellones, pozas disipadoras o colchón amortiguador; donde su función es reducir la energía cinética del flujo a la salida del tramo inclinado.

La salida se encarga de realizar la entrega del flujo desde el disipador del pie del canal hacia el canal de la conducción. La estructura de salida debe garantizar que el flujo entregado se encuentre en régimen subcrítico.

2.7.1 FLUJOS A SUPERFICIE LIBRE.

El flujo se considera uniforme cuando sus parámetros hidráulicos: velocidad, caudal y profundidad se mantienen constantes a lo largo del canal. Para que esto sea posible la pendiente del canal debe ser lo mínimo posible para que el flujo sea lo más uniforme.

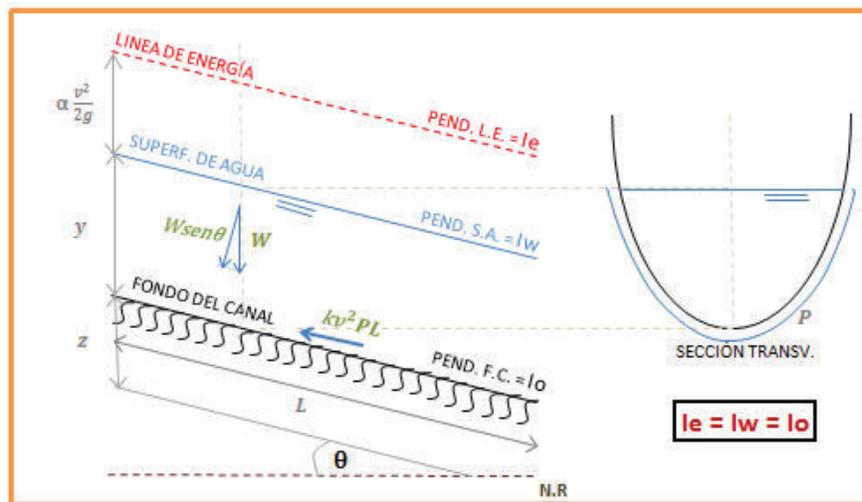
$$\frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.46)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.47)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = 0 \quad (2.48)$$

El flujo uniforme aparece cuando la componente activa de la fuerza de gravedad y la fuerza de resistencia al movimiento (fricción interna / viscosidad) están en equilibrio, originando que la pendiente de la línea de energía, la pendiente de la superficie libre de agua y la pendiente del fondo del canal sean iguales, según se muestra en la FIGURA No.2. 16.

FIGURA No. 2. 16: CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO UNIFORME.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FUENTE: Material digital y apuntes de la materia Hidráulica II.

Para el análisis del flujo es recomendable utilizar la ecuación de Darcy – Weisbach, ya que ésta considera en el efecto de la resistencia al movimiento, la rugosidad absoluta y la viscosidad.

$$h_f = \lambda \frac{L}{4R} \frac{V^2}{2g} \quad (2.49)$$



$$Q = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} AR^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (2.50)$$

Para la evaluación del caudal, aparte de la relación de Darcy – Weisbach (Ec. 2.45), se puede usar las relaciones de:

$$\text{Manning:} \quad Q = AV = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} = k_2 AR^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (2. 51)$$

$$\text{Chezy:} \quad Q = AV = AC \sqrt{RI} \quad (2. 52)$$

Tabla No. 1: CLASIFICACIÓN DEL FLUJO UNIFORME CONSIDERANDO EL EFECTO VISCOZO.

	REYNOLDS	FROUDE	TIRANTES
FLUJO LAMINAR	Re ≤ 500		
FLUJO TURBULENTO	Re ≥ 2000		
FLUJO SUPERCRÍTICO		Fr < 1	Yn > Yc
FLUJO SUBCRÍTICO		Fr > 1	Yn < Yc
FLUJO ESTABLE (SIN ONDAS DE FROUDE)		Fr < 2	
FLUJO INESTABLE (CON ONDAS DE FROUDE)		Fr > 2	

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FUENTE: Material digital y apuntes de la materia Hidráulica II.

En el flujo variado los parámetros hidráulicos como velocidad y profundidad varían a lo largo del canal.

$$\frac{\partial V}{\partial x} \neq 0 \quad (2. 53)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} \neq 0 \quad (2. 54)$$

En el flujo permanente los parámetros hidráulicos: velocidad, caudal y profundidad se mantienen constantes en el tiempo, en sí, la velocidad de una partícula en un punto definido, será la misma a cada instante de tiempo y el caudal circulante será el mismo a lo largo del canal con altura de carga constante.

$$\frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad (2. 55)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \quad (2.56)$$

$$\frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (2.57)$$

Al contrario, para flujo no permanente los parámetros hidráulicos (caudal, Q y profundidad, y) variarán en el tiempo.

Flujo Gradualmente Variado (FGV).- Existe variación gradual en la profundidad y velocidad en la dirección principal del flujo. El canal de tránsito se caracteriza por contar con pendientes pequeñas, sin cambios bruscos (discontinuidades o zigzag), superficie libre y estable.

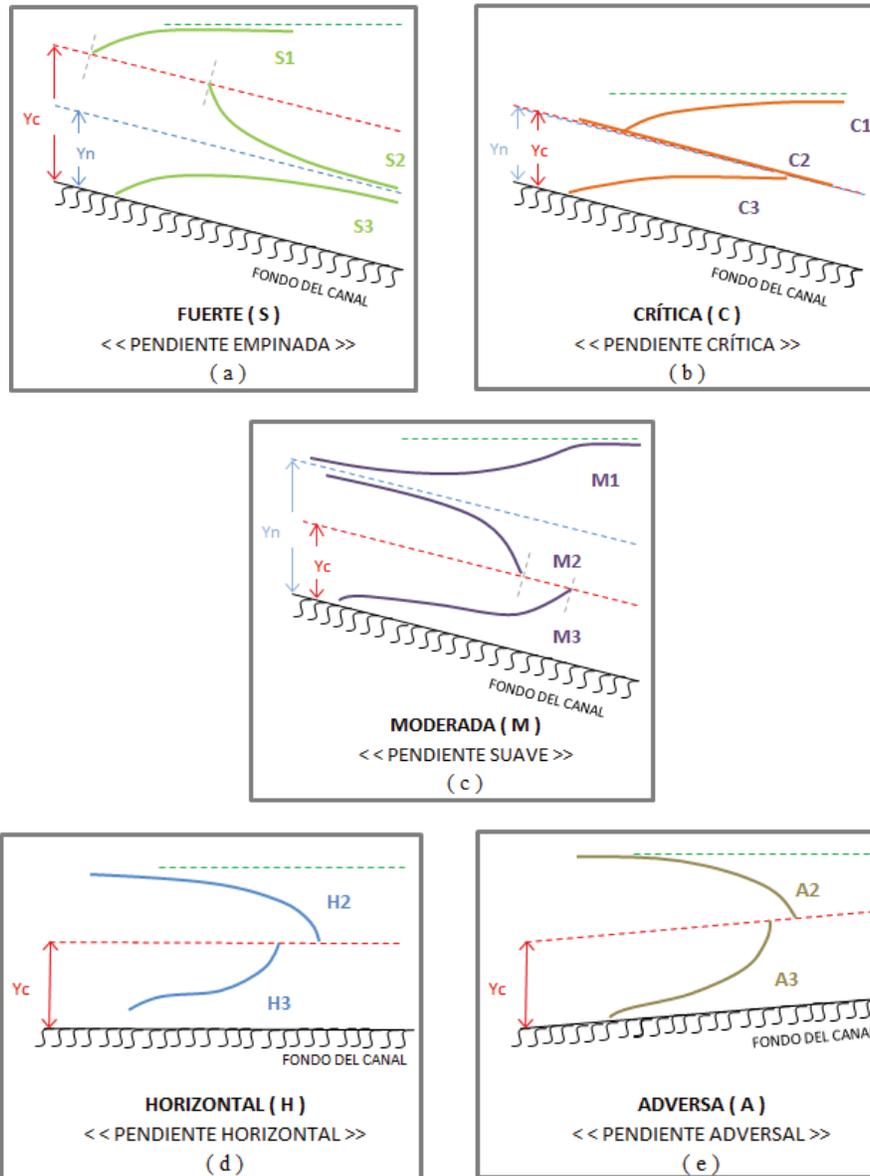
Tabla No. 2: CUADRO PARA CURVAS DE REMANSO EN FGV.

I_o	I_o, I_c	Y, Y_n, Y_c	Tipo de curva		Zona	Flujo	Gráfico
$I_o > 0$	$I_o > I_c$	$Y > Y_c > Y_n$	(+)	Creciente	S1	Subcrítico	(a)
	$Y_n < Y_c$	$Y_c > Y > Y_n$	(-)	Decreciente	S2	Supercrítico	
	FUERTE	$Y_c > Y_n > Y$	(+)	Creciente	S3	Supercrítico	
	S						
	$I_o = I_c$	$Y > Y_c = Y_n$	(+)	Creciente	C1	Subcrítico	(b)
	$Y_n = Y_c$						
	CRÍTICA	$Y_c = Y_n > Y$	(+)	Creciente	C3	Supercrítico	
	C						
	$I_o < I_c$	$Y > Y_n > Y_c$	(+)	Creciente	M1	Subcrítico	(c)
	$Y_n > Y_c$	$Y_n > Y > Y_c$	(-)	Decreciente	M2	Subcrítico	
MODERADA	$Y_n > Y_c > Y$	(+)	Creciente	M3	Supercrítico		
M							
$I_o = 0$	HORIZONTAL	$Y > Y_c$	(-)	Decreciente	H2	Subcrítico	(d)
	H	$Y < Y_c$	(+)	Creciente	H3	Supercrítico	
$I_o < 0$	ADVERSA	$Y > Y_c$	(-)	Decreciente	A2	Subcrítico	(e)
	A	$Y < Y_c$	(+)	Creciente	A3	Supercrítico	

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FUENTE: Ven Te Chow. (1994). *Flujo Gradualmente Variado*. En Hidráulica de Canales Abiertos. (pp.220 - 221). Colombia.: Mc Graw Hill.

FIGURA No. 2. 17: CURVAS DE REMANSO PARA FGV.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FUENTE: Ven Te Chow. (1994). *Flujo Gradualmente Variado*. En *Hidráulica de Canales Abiertos*. (pp.220 - 221). Colombia.: Mc Graw Hill.

Flujo Laminar y Flujo Turbulento. - Flujo laminar define al movimiento de un fluido que se desplaza en capas o en forma de láminas. Es un movimiento suave de una capa sobre otra capa, donde el intercambio molecular de cantidad de movimiento es único. Se define por tener valores de Reynolds pequeños, $Re < 1000$.

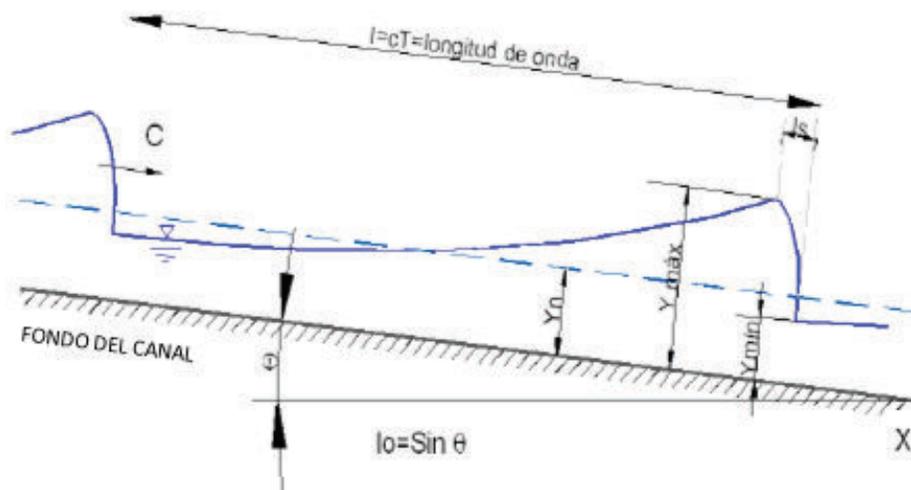
El flujo turbulento define al fluido cuyas partículas tienen un movimiento de forma errática, donde el intercambio de cantidad de movimiento es transversal, definido por tener valores de Reynolds altos, $Re > 3000$.

2.7.2 FLUJO INESTABLE (ONDAS DE FROUDE).²⁷

Como se detalló en la Tabla No. 1, el flujo inestable se define con un Número de Froude mayor a 2 ($Fr > 2$), se puede determinar con las relaciones ancho/profundidad (B/y o D/y) y el coeficiente de fricción interna (λ). El flujo inestable se presenta naturalmente en casos donde la componente de la gravedad es mayor a la componente de corte.

En este tipo de flujo se presentan ondulaciones las cuales se sobrepone a la superficie libre. En los puntos donde es necesario determinar la profundidad, se debe considerar el gasto debido a la formación de ondas. La amplitud de ondas crece gradualmente aguas abajo, y pueden llegar a romperse a la circular en un colector de gran longitud.

FIGURA No. 2. 18: ONDAS DE FROUDE A LO LARGO DEL COLECTOR (BROCK 1969).



²⁷ Haro P. & Jara M. (2010). Análisis de flujo inestable y auto aireado en canales de fuerte pendiente. Tesis Previa a la Obtención de Magister (Msc): Escuela Politécnica Nacional.

FUENTE: Naudascher, E. (2000). Flujo Inestable. En Hidráulica de Canales. México.: Limusa-Noriega Editores.

Donde:

c: Velocidad promedio de propagación de onda.

T: Período promedio de ondas.

Y_{\min} : Valor medio de la profundidad mínima de agua.

Y_{\max} : Valor medio de la profundidad máxima de agua.

Y_n : Profundidad de agua clara.

X: Distancia a la sección de entrada.

Para la evaluación de la presencia de ondas e incremento de la resistencia en canales hidráulicamente rugosos, es recomendable utilizar la relación de Rouse (1965), donde el valor que relaciona la profundidad máxima (Y_{\max}) respecto de la profundidad normal (Y_n), depende de la pendiente de fondo del colector (I_0) y del Número de Froude para Flujo Uniforme (Fr_n).

$$\frac{1}{\lambda} \cong 2 \cdot \log_{10} \frac{Rh}{\lambda \cdot k} \frac{2}{\left(\frac{Fr_n}{Fr_{cr}}\right)^3} - 0.82 \quad (2.58)$$

$$Fr_n = \frac{V_n}{\sqrt{g \cdot Y_n}} \quad (2.59)$$

$$V_n = \frac{q}{Y_n} \quad (2.60)$$

Donde:

$$\frac{Fr_n}{Fr_{cr}} > 1$$

Rh: Radio Hidráulico.

k: Altura de Rugosidad.

λ : Coeficiente de fricción interna.

Fr_n : Froude para Flujo Uniforme.

F_{cr} : Valor crítico de Froude.

2.8 RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE SOBRE EL DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE DESCARGA.²⁸

La información del presente subcapítulo y el de sus acápites, es un resumen de la parte teórica del proyecto de titulación “ANÁLISIS DE FLUJO INESTABLE Y AUTOAIREADO EN CANALES DE FUERTE PENDIENTE”, por lo que si se desea profundizar se recomienda revisar la bibliografía.

2.8.1 PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL MOVIMIENTO CON ONDULACIONES Y DE UNA MEZCLA HOMOGÉNEA DE AGUA – AIRE.²⁹

2.8.1.1 FLUJO INESTABLE - MOVIMIENTO CON ONDULACIONES.

El movimiento ondulatorio también conocido como flujo inestable se caracteriza a través del número de Froude crítico (F_{cr}), mismo que se determina de las relaciones: ancho/profundidad de los canales (B/y) y el coeficiente de fricción interna (λ).

Este parámetro es representado por un valor, por encima del cual se presentan ondas superficiales en el flujo uniforme volviéndose inestable. En la naturaleza se manifiestan al presentarse cambios locales en la profundidad de agua, donde la componente de gravedad es mayor que el esfuerzo cortante.

El flujo inestable (con ondas) está caracterizado al presentarse valores en el número de Froude superiores a uno ($Fr > 1$).

²⁸ Haro P. & Jara M. (2010). Análisis de flujo inestable y auto aireado en canales de fuerte pendiente. Tesis Previa a la Obtención de Magister (Msc): Escuela Politécnica Nacional.

²⁹ Información del acápite tomada del libro: Naudascher, E., Castro, M.: Hidráulica de Canales, Limusa-Noriega Editores, México, 2000.

Al tener un colector con una longitud considerablemente larga, la amplitud de las ondas crecerá de manera gradual hasta que las ondas lleguen a romperse aguas abajo.

2.8.2 MEZCLA HOMOGÉNEA AGUA – AIRE.

La mezcla homogénea agua – aire es identificable al presentarse el cambio de coloración en la superficie libre del flujo, indicando que la capa límite ha alcanzado la superficie libre de agua. Para realizar el cálculo y análisis de este tipo de flujo es necesario considerar la autoaireación y la formación de la capa límite.

La autoaireación genera la mezcla agua-aire a lo largo de la rápida, donde en la parte profunda del canal la masa líquida tiene burbujas de aire y en la parte superior masa de aire con gotas de agua.

La concentración media del aire (\bar{c}) establece la profundidad de flujo aireado como se indica en la siguiente expresión:

$$y_{90} = \frac{y_n}{(1 - \bar{c})} \quad (2. 61)$$

Donde:

y_{90} = Profundidad del agua con 90% de introducción de aire

y_n = Profundidad de agua clara (sin aire)

\bar{c} = Concentración media de aire

La concentración media del aire (\bar{c}) afecta la resistencia al flujo y al comportamiento de la mezcla agua – aire.

2.8.3 FENÓMENO DE RESISTENCIA AL FLUJO CON ONDAS LONGITUDINALES.³⁰

³⁰ Información del acápite tomada del libro: Naudascher, E., Castro, M.: Hidráulica de Canales, Limusa-Noriega Editores, México, 2000.

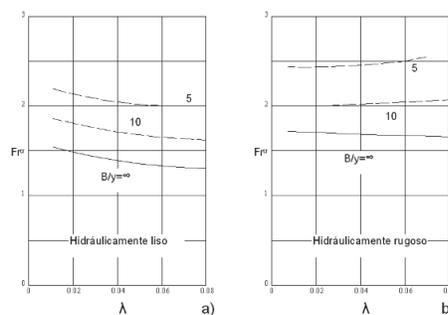
Dentro de un colector la resistencia a fluir se presenta debido a la fricción del fluido con el fondo y con las paredes laterales, provocando que el flujo se retarde ya que la fuerza de fricción trata de balancearse con la componente de la fuerza del peso en la dirección del flujo.

Como se indicó anteriormente, el número de Froude crítico relaciona los parámetros anchos/profundidad del canal (B/y) y el coeficiente de fricción interna λ , mismo que caracteriza el origen de la formación de ondas en un flujo a lo largo del canal con pendientes elevadas.

En colectores el parámetro ancho/profundidad del canal (B/y) y el coeficiente de fricción interna λ , varían de acuerdo a las características físicas de sus contornos en caso sean colectores con paredes hidráulicamente lisas (a) o colectores con paredes hidráulicamente rugosas (b), según se indica en la FIGURA No. 2. 19.

$$Fr_n = \frac{V_n}{\sqrt{g \cdot y_n}} \quad V_n = \frac{q}{y_n} \quad (2. 62)$$

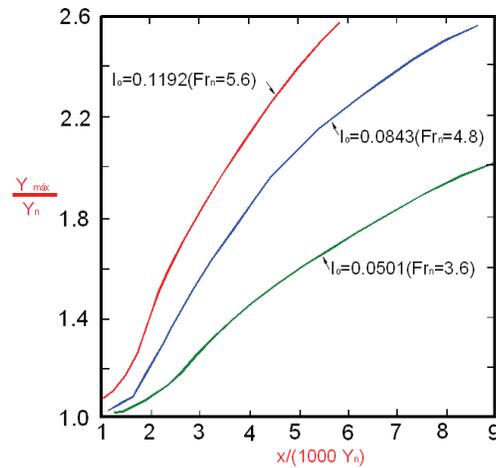
FIGURA No. 2. 19: DIAGRAMA DE LOS LÍMITES DE ESTABILIDAD EN COLECTORES DE GRAN PENDIENTE Y SECCIONES HIDRÁULICAMENTE RUGOSAS Y LISAS.



FUENTE: Hidráulica de Canales, Naudascher, E., Castro, M., Limusa-Noriega Editores., México, 2000.

En colectores de contorno hidráulicamente liso la variación en la tendencia de la relación $Y_{m\acute{a}x}/Y_n$, respecto de la pendiente de fondo y de la distancia desde su origen, puede representarse a través de la FIGURA No. 2. 20.

FIGURA No. 2. 20: CARACTERÍSTICAS DE LAS ONDAS DE FROUDE PARA UN COLECTOR DE CONTORNO HIDRÁULICAMENTE LISO.



FUENTE: Hidráulica de Canales, Naudascher, E., Castro, M., Limusa-Noriega Editores, México, 2000.

En los canales o colectores hidráulicamente rugosos, para realizar el análisis de incremento de la resistencia en el flujo y la presencia de ondas, se utiliza la relación de Rouse (1965).

$$\frac{1}{\lambda} \cong 2 \cdot \log_{10} \frac{Rh/\lambda k}{(Fr_n/F_{cr})^{2/3}} - 0.82 \quad (2. 63)$$

Donde:

Rh = Radio Hidráulico

k = Altura de Rugosidad

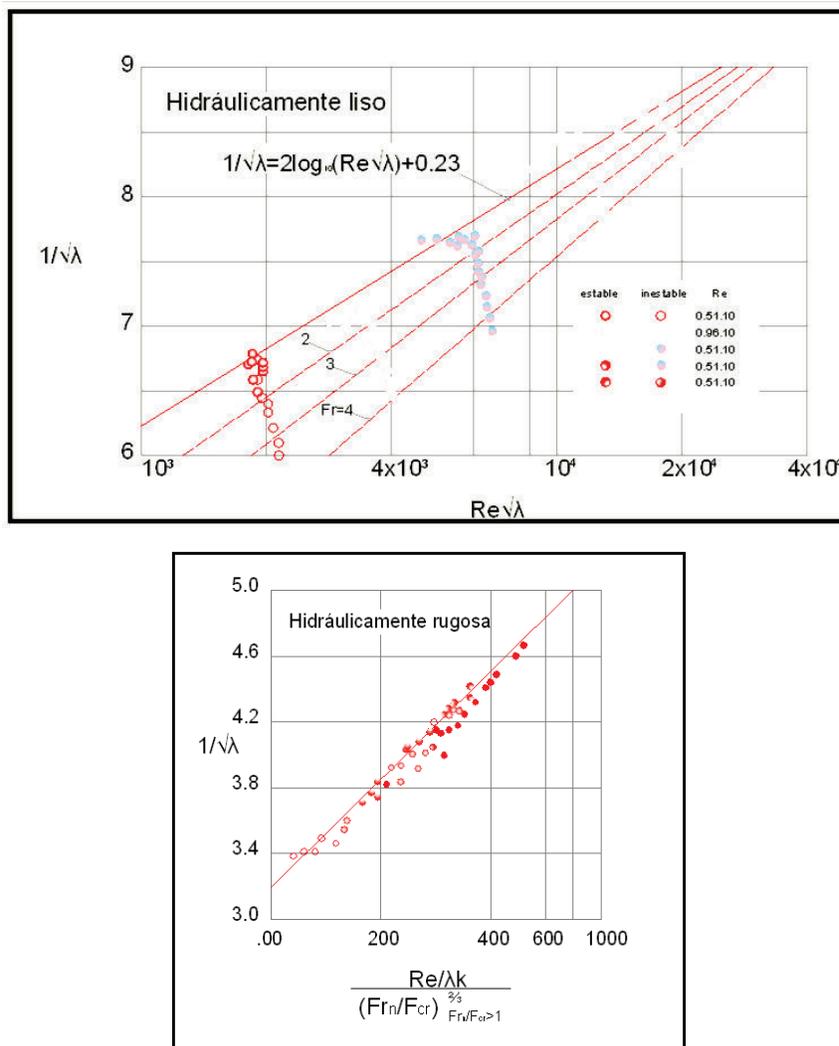
λ = Coeficiente de fricción interna

Fr_n = Froude para Flujo Uniforme

F_{cr} = Valor crítico de Froude

Mediante la FIGURA No. 2. 21, se analiza el incremento de resistencia al flujo debido a la formación de ondas de amplitud, útil para canales de contornos lisos y canales con contornos rugosos. Los gráficos han sido obtenidos mediante la experimentación realizada en canales, tomando información de la relación ancho/profundidad.

FIGURA No. 2. 21: INFLUENCIA DE LA INESTABILIDAD SOBRE EL COEFICIENTE DE RESISTENCIA Y DE DARCY-WEISBACH EN UN CANAL DE $B > 5Y$.



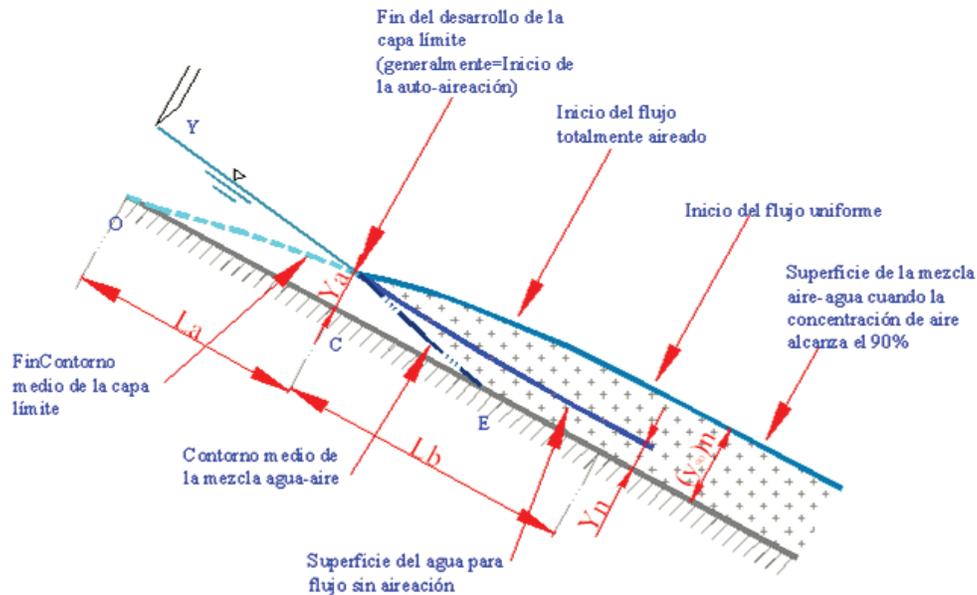
FUENTE: Hidráulica de Canales, Naudascher, E., Castro, M., Limusa-Noriega Editores, México, 2000.

2.8.4 FENÓMENO DE RESISTENCIA AL FLUJO CON INTRODUCCIÓN DE AIRE.³¹

En canales de pendiente fuerte el flujo puede alcanzar con rapidez altas velocidades, provocando la mezcla de aire con la masa de agua, esto puede suceder inclusive antes de la formación de ondas de Froude.

La FIGURA No. 2. 22 sirve como esquema para apreciar al flujo autoaireado, mismo que aparece aguas abajo de la sección (O-C), donde la capa límite alcanza la superficie libre de agua. Aguas abajo de la sección (O-C) se evidencia flujo con presencia de ondas producto de la turbulencia. Es apreciable por el cambio de coloración en la superficie libre.

FIGURA No. 2. 22: FORMACIÓN Y DESARROLLO DEL FLUJO TURBULENTO TOTALMENTE AUTOAIREADO.



FUENTE: Hidráulica de Canales, Naudascher, E., Castro, M., Limusa-Noriega Editores, México, 2000.

³¹ Información del acápite tomada del libro: Naudascher, E., Castro, M.: Hidráulica de Canales, Limusa-Noriega Editores, México, 2000.

Donde:

L_a = Representa la longitud del colector necesaria para que se desarrolle la capa límite y aparezca en la superficie libre.

L_b = Es la longitud que requiere el flujo para lograr que el aire llegue al fondo y se constituya la mezcla homogénea de agua-aire.

Según Wood (1984-1987), para la determinación de la profundidad de concentración de aire al 90% (Y_{90}), es necesario primeramente determinar la profundidad de agua clara Y_n , que al multiplicarla por la velocidad media de agua clara (V_n), equivale al caudal unitario.

$$q = Y_n \cdot V_n \quad (2. 64)$$

La concentración media de aire en un flujo a superficie libre se puede calcular con la relación:

$$\bar{c} = 0.743 \cdot \log_{10} \left(\text{sen} \frac{\theta}{q^{1/5}} \right) + 0.876 \quad (2. 65)$$

La siguiente ecuación representa los resultados experimentales de Straub y Anderson, útiles para posteriores de Wood. Integrando se obtiene:

$$y_n = (1 - \bar{c}) \cdot y_{90} \quad (2. 66)$$

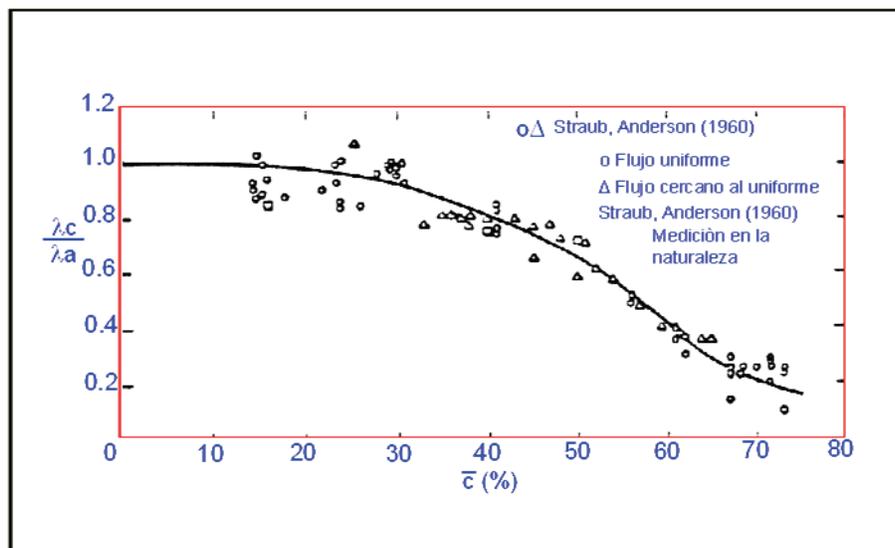
La distribución de velocidades para flujo uniforme se expresa por:

$$\frac{V_n}{V_{90}} = \left(\frac{y_n}{y_{90}} \right)^{0.158} \quad (2. 67)$$

Siendo V_{90} la velocidad del flujo a la distancia y_{90} desde el fondo del canal donde la concentración del aire es igual al 90%.

El cambio de resistencia al flujo en el fondo del canal se expresa en términos del coeficiente λ_c , de tal manera que el valor de λ_c disminuye respecto del valor correspondiente en agua clara (λ_a) teniendo una concentración media de aire $\bar{c} = 30\%$ o teniendo la inclinación del canal igual a $\theta = 22.5^\circ$. FIGURA No. 2. 23.

FIGURA No. 2. 23: RELACIÓN FUNCIONAL ENTRE LOS COEFICIENTES DE FRICCIÓN INTERNA PARA FLUJO TOTALMENTE AIREADO, λ_c PARA FLUJO SIN AIRE AL INICIO DE LA ADMISIÓN DE AIRE, λ_a Y LA CONCENTRACIÓN MEDIA DE AIRE \bar{c} .



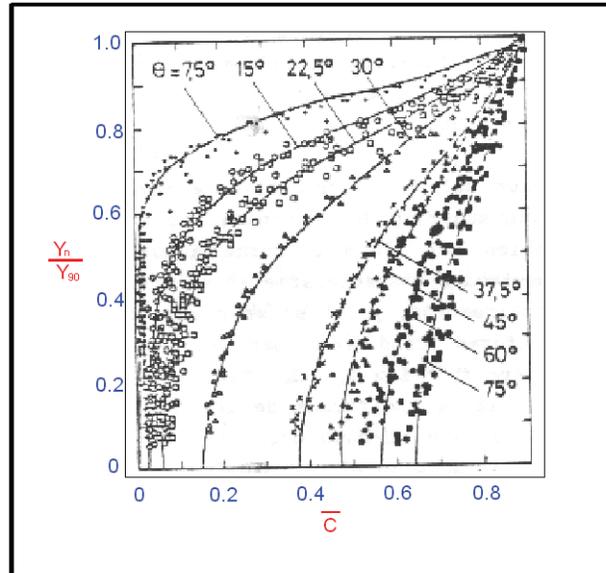
FUENTE: Hidráulica de Canales, Naudascher, E., Castro, M., Limusa-Noriega Editores, México, 2000.

El parámetro de λ_c se obtiene de la relación:

$$\lambda_c = 8 \cdot \text{sen} \theta \cdot \frac{y_n^3}{q^2} \quad (2. 68)$$

En la FIGURA No. 2. 24 se puede visualizar un esquema de la concentración de aire en el fondo a lo largo de la rápida en zona de flujo uniforme autoireado.

FIGURA No. 2. 24: DISTRIBUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE AIRE EN DIRECCIÓN NORMAL AL FONDO DEL COLECTOR PARA FLUJO UNIFORME AUTOAIREADO Y EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO DE INCLINACIÓN DEL COLECTOR.



FUENTE: Hidráulica de Canales, Naudascher, E., Castro, M., Limusa-Noriega Editores, México, 2000.

Los valores de concentración media están en función de la inclinación del canal y de la relación de profundidades de agua clara respecto de la profundidad expandida de la mezcla con aire. TABLA No. 3.

Tabla No. 3: CONCENTRACIONES MEDIAS DE AIRE EN FUNCIÓN DE LA INCLINACIÓN DEL COLECTOR.

θ (°)	\bar{c}	Y_{90}/Y_{90}
7.5	0.137	0.86
15.0	0.245	0.76
22.5	0.302	0.70
30.0	0.410	0.59
37.5	0.560	0.44
45.0	0.618	0.38
60.0	0.675	0.33
75.0	0.715	0.29

FUENTE: Hidráulica de Canales, Naudascher, E., Castro, M., Limusa-Noriega Editores, México, 2000.

Es muy importante considerar en el diseño hidráulico lo siguiente:

- a. Presencia de la autoaireación ($L > L_a$).
- b. Establecer condiciones de flujo uniforme autoaireado ($L > L_a + L_b$), según se indica en la FIGURA No. 2. 22.

La expresión usada para la evaluación de L_a es:

$$L_a = 13.6 \cdot k \cdot (\text{sen}\theta)^{0.0796} \cdot \left(\frac{q}{\sqrt{g \cdot \text{sen}\theta \cdot k^3}} \right)^{0.713} \quad (2. 69)$$

Al inicio de la autoaireación la variación de L_a es poca con el cambio de la rugosidad, por ejemplo variando la rugosidad de $k = 1$ mm a $k = 2$ mm, la longitud L_a disminuye un 10%.

Mediante el cálculo de la longitud requerida con flujo gradualmente variado se puede estimar L_b , el flujo alcanzará la profundidad Y_{90} desde la profundidad Y_a , profundidad donde inicia la autoaireación:

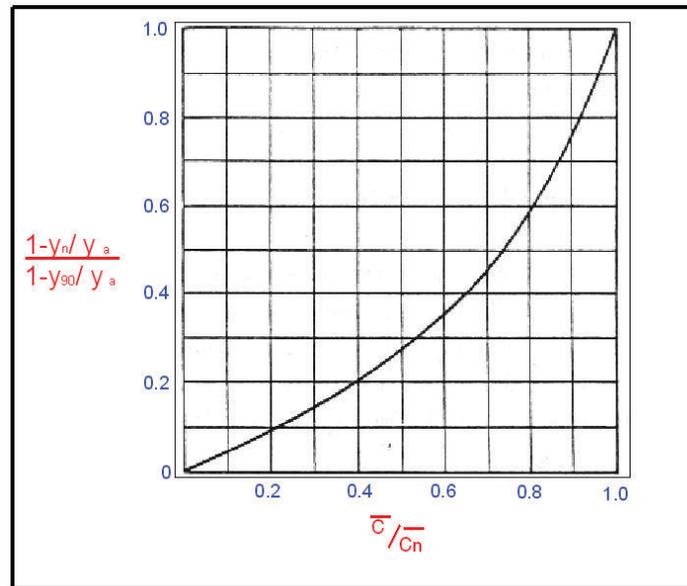
$$Y_a = 0.223 \cdot k \cdot (\text{sen}\theta)^{-0.04} \cdot \left(\frac{q}{\sqrt{g \cdot \text{sen}\theta \cdot k^3}} \right)^{0.643} \quad (2. 70)$$

El parámetro k corresponde a valores de rugosidad en (mm) (Press/Schroder 1966).³²

El diagrama mostrado en la FIGURA No. 2. 25 permite obtener bases de cálculo de la profundidad local de agua clara (Y_n) en relación con la profundidad de agua al inicio de la introducción de aire (Y_a), para distintos ángulos de inclinación del fondo del canal y para distintos grados de rugosidad k/Y_a .

³² Hidráulica de Canales, Naudascher, E., Castro, M., Limusa-Noriega Editores, México, 2000.

FIGURA No. 2. 25: DIAGRAMA PARA EL CÁLCULO DE FLUJO NO UNIFORME CON AUTOAIREACIÓN SEGÚN WOOD (1987).



FUENTE: Hidráulica de Canales, Naudascher, E., Castro, M., Limusa-Noriega Editores, México, 2000.

Donde:

y_n = Profundidad de agua clara.

y_{90} = Profundidad del agua con 90% de introducción de aire.

y_a = Profundidad del agua en la sección de inicio de la aireación.

\bar{c} = Concentración media

\bar{c}_n = Concentración media de aire a lo largo de la profundidad de agua clara.

Según Chow (1959) el valor referencial de la velocidad media del flujo en la cual inicia la autoaireación es 7 m/s, y la velocidad crítica dependerá de factores como la forma de la sección al inicio del colector, la rugosidad, la forma de la sección transversal a lo largo del canal, caudal circulante y la pendiente de fondo.³³

³³ United States Department of the Interior, USBR.: "Design of Small Canal Structures", A Water Resources Technical Publication, Denver, Co., 1974

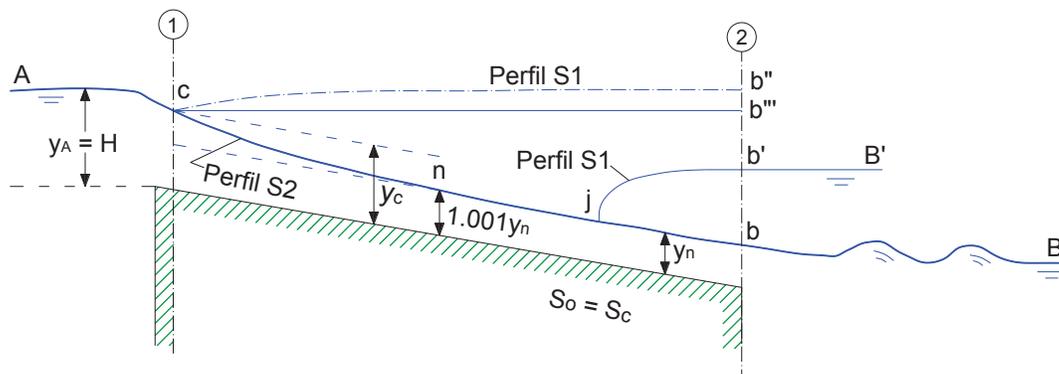
2.8.5 CONDICIONES HIDRODINÁMICAS PRESENTES A LA ENTRADA Y AL PIE DE UN CANAL DE FUERTE PENDIENTE.³⁴

Para el diseño de canales con fuerte pendiente es necesario ubicar una sección de control con características de flujo cuasi uniforme donde sea posible aplicar las ecuaciones básicas de hidráulica.

Las transiciones son un caso particular por sus condiciones geométricas, donde se puede utilizar la teoría de flujo gradualmente variado (FGV) en el diseño para tratar de mantener líneas de corriente suaves y aproximadamente paralelas con el fin de minimizar las ondas estacionarias

Para flujo supercrítico la sección de control se encontrará aguas arriba, en la sección 1 como se indica en la FIGURA No. 2. 26, la entrega del caudal al canal estará controlada totalmente por el caudal crítico.

FIGURA No. 2. 26: ENTREGA EN UN CANAL CON FLUJO SUPERCRÍTICO.



FUENTE: Hidráulica de los Canales Abiertos, Chow, V.T., McGraw Hill Ed. Co., New York – Bogotá, 1959

El tipo de perfil de flujo en un canal de fuerte pendiente dependerá de las condiciones aguas abajo como se indica en la Tabla No. 4.

³⁴ Información del Acápito tomada del libro Hidráulica de los Canales Abiertos, Chow, V.T., McGraw Hill Ed. Co., New York – Bogotá, 1959

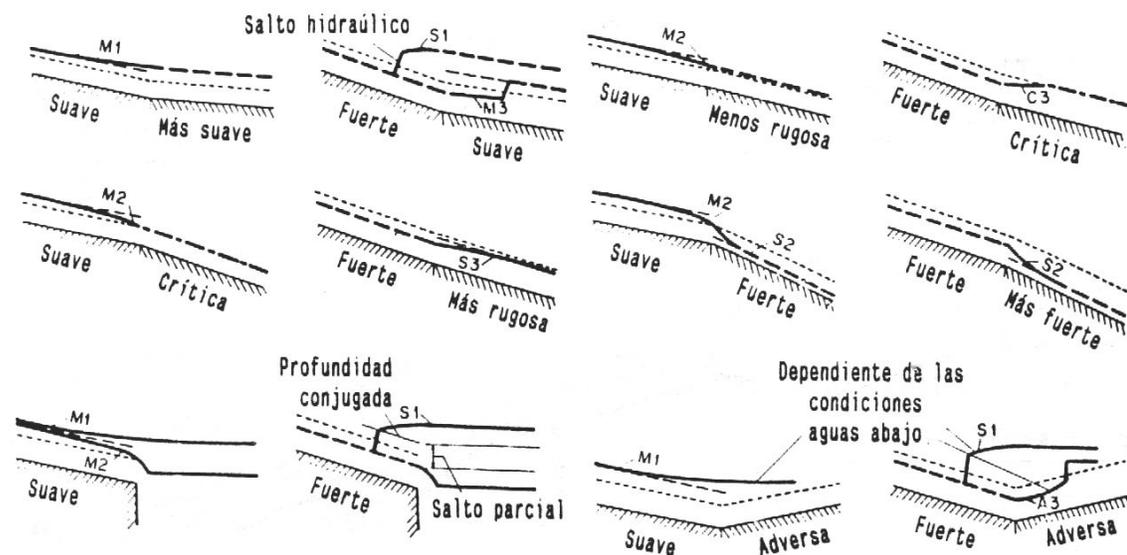
Tabla No. 4: TIPO DE PERFIL DE FLUJO EN UN CANAL DE FUERTE PENDIENTE.

Si: nivel de B aguas abajo		Menor que la profundidad de salida en la sección 2.		Aguas abajo el flujo no se afecta por el nivel de agua
Si: nivel de B aguas abajo		Mayor que la profundidad de salida en la sección 2.		El nivel de aguas abajo aumentará formándose un resalto hidráulico en el extremo de j. El flujo de aguas antes del resalto no se afectará por el nivel de aguas abajo.
Si: nivel de B aguas abajo		Aumenta		El resalto hidráulico se mueve hacia aguas arriba, manteniendo forma y altura en nb de flujo uniforme hasta alcanzar n. Desde ese punto el resalto se mueve aguas arriba sobre la curva cn disminuyendo su altura de manera gradual. La altura del resalto será cero cuando alcance la profundidad crítica en c.

FUENTE: Haro y Jara. (2010). Análisis de Flujo Inestable y Autoaireado en Canales de Fuerte Pendiente, Tesis de E.P.N. Director Dr. Marco Castro Delgado, Quito, Ecuador.

Los perfiles en la unión de dos colectores diferentes pendientes se indican en la FIGURA No. 2. 27.

FIGURA No. 2. 27: PERFILES DE FLUJO PARA CAMBIOS DE PENDIENTE DE COLECTORES Y CAMBIOS DE RUGOSIDAD.



FUENTE: Hidráulica de los Canales Abiertos, Chow, V.T., McGraw Hill Ed. Co., New York – Bogotá, 1959

2.8.6 CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE CANALES DE FUERTE PENDIENTE.

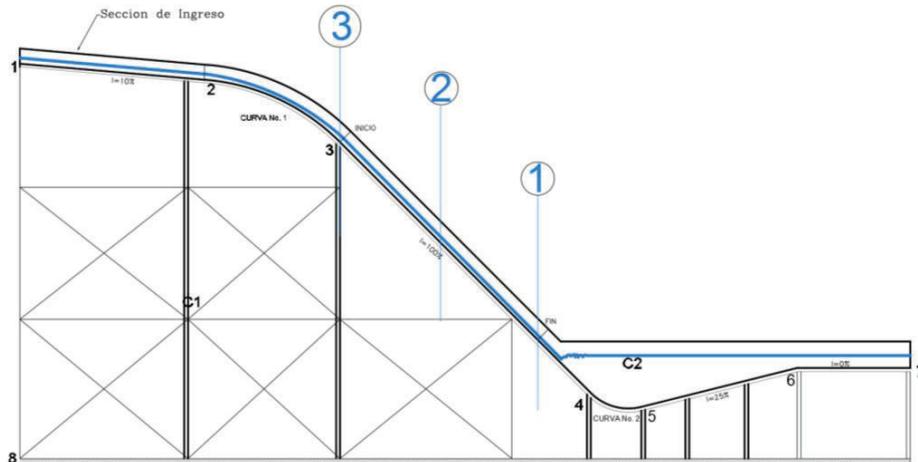
- Diseño del canal con sección prismática y con flujo uniforme, considerando el valor del calado crítico (y_c).
- Cálculo del número de Froude para flujo uniforme, útil para proceder al cálculo de los parámetros de longitud desde el inicio del colector hasta donde empieza la autoaireación (L_a) y profundidad de inicio de la autoaireación (y_a).
- A partir del valor (y_a), se obtendrá el Número de Froude al inicio de la autoaireación y el valor de la rugosidad relativa.
- El valor de la rugosidad relativa permite obtener el coeficiente de fricción (λ_a).
- Mediante tablas, en función de la pendiente se puede obtener el valor de la concentración de aire.
- Con los parámetros anteriores, mediante un ábaco se establecerá el valor de λ_c , coeficiente que permite determinar la profundidad normal de agua clara, y posteriormente el valor de la profundidad de la mezcla agua-aire con una concentración del 90% de aire (y_{90}).
- Comparando el valor del calado crítico (y_c) con el calado (y_{90}) se definirá la altura del canal.

2.8.7 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELO FÍSICO, ESCALA, RANGOS DE CAUDALES DE OPERACIÓN, INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

2.8.7.1 METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES.

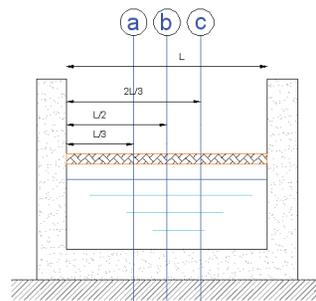
Para la obtención de datos experimentales se plantea el esquema de la FIGURA No. 2. 28 y No. 2. 29 para canal rectangular, similares para condiciones lisas como para condiciones rugosas.

FIGURA No. 2. 28: ESQUEMA DE MEDICIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES EN LA RÁPIDA.



FUENTE: Haro y Jara. (2010). Análisis de Flujo Inestable y Autoaireado en Canales de Fuerte Pendiente, Tesis de E.P.N. Director Dr. Marco Castro Delgado, Quito, Ecuador.

FIGURA No. 2. 29: SECCIÓN RECTANGULAR TRANSVERSAL DEL CANAL.



FUENTE: Haro y Jara. (2010). Análisis de Flujo Inestable y Autoaireado en Canales de Fuerte Pendiente, Tesis de E.P.N. Director Dr. Marco Castro Delgado, Quito, Ecuador.

Los diagramas de las figuras anteriores muestran los sitios de medición, longitudinalmente y en las secciones. Longitudinalmente se determinaron tres sitios de medición (1, 2, 3), al inicio, en medio, y al final del canal rectangular de fuerte pendiente, donde en cada punto se ubicarán piezómetros para la lectura del calado y carga de velocidad en las posiciones de la sección transversal (a, b, c), donde cada posición transversal tiene las distancias $L/3$, $L/2$ y $2/3L$.

El calado se midió con cinta métrica mientras que la carga de velocidad se obtuvo utilizando un tubo Prandtl.

Los caudales ensayados en el modelo físico fueron 4, mismos que se determinaron través de un sistema piezométrico ubicado en el tanque de estabilización que se encera antes del inicio de pruebas.

2.8.7.2 SÍNTESIS DEL PROCESAMIENTO DE LOS RESULTADOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES.

Para realizar la evaluación física y experimental de los problemas planteados en el modelo físico se utilizó la Rápida de Descarga empleada en el Modelo Hidráulico Reducido de las Obras de Derivación y Desvío de la Quebrada el Batán como se puede observar en la Fotografía No.1, construido por la Escuela Politécnica Nacional en convenio con la Empresa Metropolitana de Agua Potable y Alcantarillado de Quito (EMAAPQ), en el año 2000.

En el modelo físico se empleó el criterio de similitud de Froude, haciendo la consideración que las fuerzas inerciales y gravitacionales predominan mayoritariamente.

El caudal utilizado fue el del sistema de distribución de caudales de presión del Laboratorio de Investigaciones Hidráulicas por medio de tuberías de PVC de 315 mm de diámetro interno. El caudal se regula a través de la operación de válvulas.

Fotografía No. 2: RÁPIDA DE DESCARGA MODELO QUEBRADA BATÁN.



FUENTE: Estudio en modelo hidráulico de las obras de derivación y desvío de la Quebrada el Batán, EPN - EMAAPQ, 2000.

2.8.8 DATOS EXPERIMENTALES.

Para el procesamiento de resultados, los datos obtenidos fueron a través los esquemas que a continuación se presentan:

Fotografía No. 3: UBICACIÓN DE PIEZÓMETROS.



Fotografía No. 4: SISTEMA PIEZOMÉTRICO, PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDALES (EPN-EMAAPQ/2000).



Fotografía No. 5: INSTRUMENTO DE MEDICIÓN DE LA CARGA DE VELOCIDAD (Tubo Prandtl).



Los esquemas para la obtención de datos se han indicado en las FIGURAS No. 2. 28 y 2. 29.

En las tablas que se prestan a continuación se muestra los datos tomados en el modelo físico durante los ensayos para los diferentes caudales, en las respectivas secciones de inicio y fin de la rápida.

Tabla No. 5: CANAL RECTANGULAR (SUPERFICIE HIDRÁULICAMENTE LISA).

CONTORNOS LISOS							
Pasos	Medida	Unidad	Q₁	Q₂	Q₃	Q₄	Observación
1	h_v vertedero encerado	(cm)	19,95	19,95	19,95	19,95	Carga sobre el vertedero (en el momento de encerar)
2	h_{1v}	(cm)	30,65	37,86	37,76	36,7	Carga sobre el vertedero al final de la prueba en el modelo
3	B	(cm)	40	40	40	40	Ancho del canal
4	lo	(o)	45	45	45	45	Pendiente del Canal
Posición No. 1							
4	C_{v a}	(cm)	45,5	105,2	70,5	92	Carga de Velocidad posición transversal a
5	C_{v b}	(cm)	36,87	111,5	66,3	82,5	Carga de Velocidad posición transversal b
6	C_{v c}	(cm)	49,2	110,5	66	88,5	Carga de Velocidad posición transversal c
7	Y_{n1}	(mm)	4	10	12	7	Calado Normal observable Posición No. 1
Posición No. 2							
8	C_{v a}	(cm)	55,8	95,5	79	83,4	Carga de Velocidad posición transversal a
9	C_{v b}	(cm)	42,4	105	85	85,1	Carga de Velocidad posición transversal b
10	C_{v c}	(cm)	56	100,7	86	89,5	Carga de Velocidad posición transversal c
11	Y_{n2}	(mm)	4	10	11	7	Calado Normal observable Posición No. 2
Posición No. 3							
12	C_{v a}	(cm)	37,5	86,5	100,5	78,1	Carga de Velocidad posición transversal a
13	C_{v b}	(cm)	33	81	104	76,6	Carga de Velocidad posición transversal b
14	C_{v c}	(cm)	39,1	75	103,7	76,2	Carga de Velocidad posición transversal c
15	Y_{n3}	(mm)	4,1	13	10	7,5	Calado Normal observable Posición No. 3

FUENTE: Haro y Jara. (2010). Análisis de Flujo Inestable y Autoaireado en Canales de Fuerte Pendiente, Tesis de E.P.N. Director Dr. Marco Castro Delgado, Quito, Ecuador.

Tabla No. 6: CANAL RECTANGULAR (SUPERFICIE HIDRÁULICAMENTE RUGOSA).

CONTORNOS RUGOSOS							
Pasos	Medida	Unidad	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Observación
1	hvertedero encerado	(cm)	19,95	19,95	19,95	19,95	Carga sobre el vertedero (en el momento de encerar)
2	h _{1v}	(cm)	28,61	34,75	28,13	31,09	Carga sobre el vertedero al final de la prueba en el modelo
3	B	(cm)	40	40	40	40	Ancho del canal
4	lo	(o)	45	45	45	45	Pendiente del Canal
Posición No. 1							
5	Cv _a	(cm)	17	30,2	6,9	9	Carga de Velocidad posición transversal a
6	Cv _b	(cm)	16	31	6,9	10	Carga de Velocidad posición transversal b
7	Cv _c	(cm)	16,4	29,8	10	11,6	Carga de Velocidad posición transversal c
8	Yn1	(mm)	7	15	5	10	Calado Normal observable Posición No. 1
Posición No. 2							
9	Cv _a	(cm)	13	29,1	10,3	18	Carga de Velocidad posición transversal a
10	Cv _b	(cm)	13,5	29,6	8,6	16	Carga de Velocidad posición transversal b
11	Cv _c	(cm)	14	31,2	10,9	17,8	Carga de Velocidad posición transversal c
12	Yn2	(mm)	7	20	5	10	Calado Normal observable Posición No. 2
Posición No. 3							
13	Cv _a	(cm)	18,9	30,5	10,7	11,3	Carga de Velocidad posición transversal a
14	Cv _b	(cm)	16,2	27,2	9,6	11,9	Carga de Velocidad posición transversal b
15	Cv _c	(cm)	16,6	24,9	10,6	14,5	Carga de Velocidad posición transversal c
16	Yn3	(mm)	7	15	5	12	Calado Normal observable Posición No. 3

FUENTE: Haro y Jara. (2010). Análisis de Flujo Inestable y Autoaireado en Canales de Fuerte Pendiente, Tesis de E.P.N. Director Dr. Marco Castro Delgado, Quito, Ecuador.

Tabla No. 7: REGISTRO DE DATOS PARA CANAL RECTANGULAR (SUPERFICIE HIDRÁULICAMENTE LISA).

		CONTORNO LISO						
	Pasos	Medida	Unidad	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Observación
DATOS	1	hvertedero encerado	(cm)	19,95	19,95	19,95	19,95	Carga sobre el vertedero (al momento de encerar el modelo)
	2	Θ	(°)	45	45	45	45	Ángulo del canal
	3	h _{1v}	(cm)	30,65	37,86	37,76	36,7	Carga registrada sobre el vertedero (para el caudal utilizado en la prueba)
	4	B	(cm)	40	40	40	40	Ancho del canal
	5	Y _n	(cm)	0,405	1,1	1	0,716	Calado Normal observable
	6	V ₁	(m/s)	2,67	4,62	4,48	3,88	Velocidad al inicio del colector
	7	V ₂	(m/s)	2,93	3,98	3,64	4,14	Velocidad al final del colector
	8	k	(mm)	0,003	0,003	0,003	0,003	Rugosidad (Press/Schroder)
	9	Δh vertedero	(cm)	10,7	17,91	17,81	16,75	Diferencia de hmedia y h _{1v} vertedero encerado
CÁLCULOS	1	V _{promedio}	m/s	2,8	4,3	4,06	4,01	
	2	Q	(m ³ /s)	0,0045	0,0189	0,0162	0,0115	$Q = V * A$
	3	q	(m ³ /s)/m	0,0113	0,0473	0,0406	0,0287	Caudal Unitario $q = \frac{Q}{B}$
	4	F _{cr}	s/u	2,5	10,4	8,9	6,3	Froude Crítico $F_{cr} = \frac{q}{\sqrt{g * \text{sen}(\theta) * k^3}}$
	5	Ve	s/u	1,6	6,6	5,7	4,1	Número de Vedernikov $Ve = \frac{2}{3} * \frac{b}{b + 2y_n} * F_{cr}$
	6	y _n /B	s/u	0,010	0,028	0,025	0,018	Relación

FUENTE: Haro y Jara. (2010). Análisis de Flujo Inestable y Autoaireado en Canales de Fuerte Pendiente, Tesis de E.P.N. Director Dr. Marco Castro Delgado, Quito, Ecuador.

Tabla No. 8: REGISTRO DE DATOS PARA CANAL RECTANGULAR (SUPERFICIE HIDRÁULICAMENTE RUGOSA).

		CONTORNO RUGOSO						
	Pasos	Medida	Unidad	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Observación
DATOS	1	hvertedero encerado	(cm)	19,95	19,95	19,95	19,95	Carga sobre el vertedero (al momento de encerar el modelo)
	2	⊙	(°)	45	45	45	45	Ángulo del canal
	3	h _{1v}	(cm)	28,61	34,75	28,13	31,09	Carga registrada sobre el vertedero (para el caudal utilizado en la prueba)
	4	B	(cm)	40	40	40	40	Ancho del canal
	5	Y _n	(cm)	0,7	1,666	0,5	1,1	Calado Normal observable
	6	V _i	(m/s)	1,57	2,32	1,42	1,8	Velocidad al inicio del colector
	7	V _f	(m/s)	1,41	2,43	1,24	1,83	Velocidad al final del colector
	8	k	(mm)	0,03	0,03	0,03	0,03	Rugosidad (Press/Schroder)
	9	Δh vertedero	(cm)	8,66	14,8	8,18	11,14	Diferencia de hmedia y h _{1v} vertedero encerado
CÁLCULOS	1	V _{promedio}	m/s	1,49	2,375	1,33	1,815	
	2	Q	(m ³ /s)	0,0042	0,0158	0,0027	0,0080	$Q = V * A$
	3	q	(m ³ /s)/m	0,0104	0,0396	0,0067	0,0200	Caudal Unitario $q = \frac{Q}{B}$
	4	F _{cr}	s/u	0,7	2,7	0,5	1,4	Froude Crítico $F_{cr} = \frac{q}{\sqrt{g * \text{sen}(\theta) * k^3}}$
	5	Ve	s/u	0,5	1,7	0,3	0,9	Número de Vedernikov $Ve = \frac{2}{3} * \frac{b}{b + 2y_n} * F_{cr}$
	6	y _n /B	s/u	0,018	0,042	0,013	0,028	Relación

FUENTE: Haro y Jara. (2010). Análisis de Flujo Inestable y Autoaireado en Canales de Fuerte Pendiente, Tesis de E.P.N. Director Dr. Marco Castro Delgado, Quito, Ecuador.

De las pruebas realizadas en la tesis de maestría “Análisis de Flujo Inestable y autoaireado en Canales de Fuerte Pendiente Haro y Jara, (2010)” se llega al resumen de la Tabla No. 9 para contorno liso y Tabla No. 10 para contorno rugoso.

Los datos de las siguientes tablas son los más relevantes del estudio y que serán utilizados para el análisis de la presente investigación.

Tabla No. 9: DATOS DE LABORATORIO PARA CANAL RECTANGULAR (SUPERFICIE HIDRÁULICAMENTE LISA).

Caudal Q (lt/s)	Velocidad V(m/s)	y_n/B	Número de Froude crítico Fcr	Número de Vedernikov V_e
4,53	2,80	0,010	2,5	1,6
11,48	4,01	0,018	6,3	4,1
16,24	4,06	0,025	8,9	5,7
18,92	4,30	0,028	10,4	6,6

FUENTE: Haro y Jara. (2010). Análisis de Flujo Inestable y Autoaireado en Canales de Fuerte Pendiente, Tesis de E.P.N. Director Dr. Marco Castro Delgado, Quito, Ecuador.

Tabla No. 10: DATOS DE LABORATORIO PARA CANAL RECTANGULAR (SUPERFICIE HIDRÁULICAMENTE RUGOSA).

Caudal Q (lt/s)	Velocidad V(m/s)	y_n/B	Número de Froude crítico Fcr	Número de Vedernikov V_e
2,66	1,33	0,013	0,5	0,3
4,17	1,49	0,018	0,7	0,5
7,99	1,82	0,028	1,4	0,9
15,83	2,38	0,042	2,7	1,7

FUENTE: Haro y Jara. (2010). Análisis de Flujo Inestable y Autoaireado en Canales de Fuerte Pendiente, Tesis de E.P.N. Director Dr. Marco Castro Delgado, Quito, Ecuador.

CAPÍTULO 3

DESCRIPCIÓN DEL PAQUETE COMPUTACIONAL OpenFOAM.

3.1 INTRODUCCIÓN.

OpenFOAM® (Open Field Operation and Manipulation) es una herramienta informática de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de código libre producida por OpenCFD Ltd. Se desarrolló como estrategia colaborativa en el área de ciencia e ingeniería, ayudando a optimizar tiempo-costo en el pre diseño y diseño de modelos útiles en Dinámica de Fluidos.

OpenFOAM cuenta con un amplio rango de modelos ejecutables útiles en el área de ingeniería y ciencias, mediante métodos numéricos para la resolución de flujos complejos, como: reacciones químicas, transferencia de calor, turbulencia, mecánica de sólidos y electromagnetismo. El programa posee herramientas propias para el desarrollo del mallado, para el pre procesamiento de datos y post procesamiento de resultados.

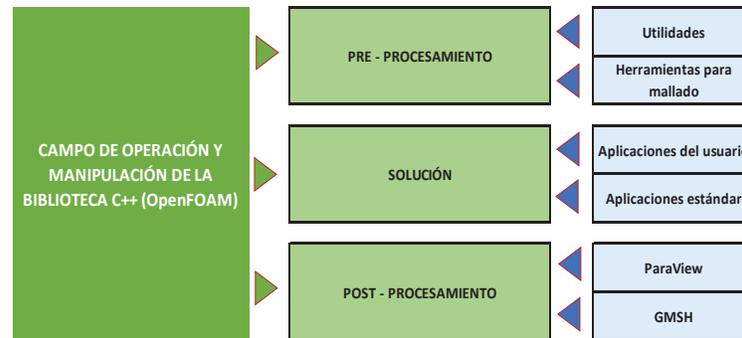
3.2 GENERALIDADES DE OpenFOAM.

OpenFOAM es un software de uso libre que permite el acceso al código fuente de las plantillas, lo que facilita su utilización. Se ejecuta en la plataforma LINUX, que está basada en librerías de lenguaje de código C++, que es un lenguaje de programación orientado a objetos.

Para llevar a cabo la simulación de un problema mediante metodología CFD en el programa computacional, es conveniente conocer y comprender la estructura de casos. Un caso se define como el conjunto de carpeta que contienen a los archivos ejecutables necesarios para la resolución de un problema ingenieril específico como se detalla posteriormente.

En la FIGURA No. 3.1 se presenta el esquema de organización global del paquete computacional OpenFOAM. Este esquema general permite al usuario conocer de la operación y manipulación de información en el programa.

FIGURA No. 3. 1: ESQUEMA DE LA ESTRUCTURA GENERAL DEL PAQUETE COMPUTACIONAL OpenFOAM CON SUS HERRAMIENTAS A UTILIZAR EN UNA SIMULACIÓN NUMÉRICA COMPLETA.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FUENTE: Greenshields C. (2011-2015). *Introduction*. En OpenFOAM, The Open Source CFD Toolbox – User Guider. (p. U15). ESI Group.

Dependiendo del tipo de problema se seleccionarán las utilidades y solucionadores adecuados.

OpenFOAM permite la modificación y ampliación de los solucionadores por parte del usuario en el caso que no se cuente con un solucionador específico para un determinado problema, por lo que es necesario tener conocimiento del lenguaje de programación C++.

3.2.1 INSTALACIÓN DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL OpenFOAM EN LA PLATAFORMA LINUX.

El producto oficial OpenFOAM en la versión que el usuario la requiera se puede descargar de la página web: www.openfoam.org. El software obtenido será en las versiones compatibles con LINUX y también las versiones que son compatibles con WINDOWS, para la cual es necesario realizar la instalación de una computadora virtual (VirtualBox).

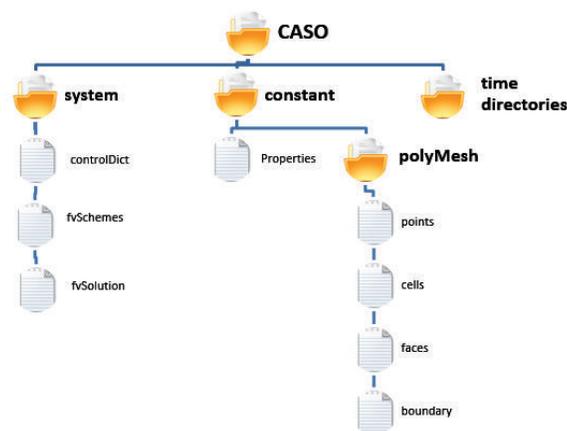
Las instrucciones para la instalación de OpenFOAM dependerán de la versión del sistema operativo LINUX instalado en el ordenador y de la versión del OpenFOAM, por lo que se recomienda seguir las indicaciones del proveedor del producto en cada caso (APÉNDICE A).

Para el desarrollo de este proyecto de investigación se ha instalado UBUNTU 14.04 del sistema operativo LINUX y el programa computacional OpenFOAM 3.0.1 versión existente al momento de iniciar el presente estudio, al momento se puede encontrar la última versión OpenFOAM 4.1.

3.2.2 ESTRUCTURA DE UN CASO EN EL PAQUETE COMPUTACIONAL OpenFOAM.³⁵

En OpenFOAM se conoce como CASO al conjunto de carpetas y archivos que definen un problema específico en estudio, así como a la forma como se lo resolverá a los solucionadores que se utilizarán, tal como se describe en la FIGURA No. 3. 2.

FIGURA No. 3. 2: DIRECTORIO DEL ESQUEMA NUMÉRICO EN OpenFOAM DE UN CASO EN GENERAL.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FUENTE: Greenshields C. (2011-2015). *File structure of OpenFOAM cases*. En OpenFOAM, The Open Source CFD Toolbox – User Guider. (pp.U105 – U106). ESI Group.

³⁵ Furlan P. (2013). Simulación numérica de flujo en confluencia, Tesis de Universidad Nacional de Córdoba. Directora Pozzi Cecilia, Córdoba - Argentina.

System.- Es un directorio utilizado para calibrar los parámetros de resolución de un caso. Dentro de esta carpeta tenemos tres subcarpetas:

- Sub-Carpeta controlDict, contiene parámetros para control de la corrida y configuración de tiempos de inicio y fin. También se configuran los intervalos de tiempo en los que se guardan resultados.
- Sub-Carpeta fvSchemes, corresponde a un diccionario donde se pueden discretizar esquemas de solución y controla los solucionadores de las ecuaciones lineales.
- Sub-Carpeta fvSolution, en esta carpeta se encuentran los solucionadores de ecuaciones. Aquí se configuran las tolerancias y los algoritmos de resolución de las corridas.

Constant.- Este directorio contiene la información de descripción y desarrollo de la malla, contiene una subcarpeta llamada polyMesh, dentro de la cual están los archivos propios del mallado.

Time o Carpeta 0.- Este directorio contiene archivos individuales de datos de los campos del problema. Datos de condiciones de borde o frontera que el usuario define para realizar la corrida en el paquete computacional OpenFOAM.

El paquete computacional OpenFOAM tiene como componentes las siguientes aplicaciones que se clasifican en dos categorías:

- 1) Solucionadores (Solvers).- Se encargan de resolver las ecuaciones que gobiernan el fenómeno físico y son diseñados para problemas específicos en mecánica de fluidos para medios continuos.
- 2) Utilitarios o utilerías (Utilities).- Son aplicaciones para realizar ejercicios donde sea conveniente la manipulación de datos antes o luego de emplear un solucionador.

OpenFOAM suministra entornos para facilitar el desarrollo del problema requerido, entre los que se tiene:

ParaView.- Es un entorno de pos-procesamiento suministrado por el programa computacional cuya interfaz facilita el manejo de datos y la visualización de resultados.

BlockMesh.- Tiene como función desarrollar el mallado de los problemas planteados, mediante el mismo se puede discretizar el dominio. Es un mallador suministrado por el programa computacional.

3.2.3 UNIDADES DIMENSIONALES EN OpenFOAM.

El paquete computacional tiene la versatilidad de poder usar cualquier sistema de unidades, puesto que al ser código libre el usuario puede configurar estos parámetros.

Para el presente proyecto se usará el Sistema Internacional (SI), como se indica a continuación.

Tabla No. 11: UNIDADES BÁSICAS EN EL SISTEMA INTERNACIONAL (SI).

N°	PROPIEDAD	SISTEMA INTERNACIONAL
1	MASA	Kilogramo (Kg)
2	LONGITUD	Metro (m)
3	TIEMPO	Segundo (s)
4	TEMPERATURA	Grado Kelvin (°K)
5	MATERIA	Mol (mol)
6	CORRIENTE	Amperio (A)
7	INTENSIDAD DE LUZ	Candela (cd)

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FUENTE: Greenshields C. (2011-2015). *Dimensional Units*. En OpenFOAM, The Open Source CFD Toolbox – User Guide. (pp.U109 – U110). ESI Group.

Las unidades se expresan en la forma de un arreglo vectorial, representado por 7 valores dentro de corchetes. Si una variable es adimensional el arreglo constará con valores cero, así: [0 0 0 0 0 0 0]. Cada valor tiene una posición lógica tomando como referencia la Tabla No. 11.

Por ejemplo, si se desea ingresar unidades de presión en [Kg/m.s²], según la Tabla No. 11 los valores corresponderán a las posiciones 1, 2 y 3 del arreglo vectorial, quedando [1 -1 -2 0 0 0].

3.2.4 SOLUCIONADOR DE LAS ECUACIONES QUE GOBIERNAN EL FLUJO.³⁶

La selección correcta del solucionador de las ecuaciones que gobiernan al flujo depende del tipo de problema a resolver, considerando si se tiene un fluido compresible o incompresible, flujo transitorio o estacionario, laminar o turbulento. Las diferentes alternativas de solucionadores con sus características se pueden encontrar en el Manual de Usuario (User Guide), sección 3.5. Ciertos solucionadores se explican a continuación:

Flujos Incompresibles:

- icoFoam: Se usa para flujo transitorio y régimen laminar.
- pisoFoam: Se usa para flujo transitorio y régimen laminar o turbulento.
- simpleFoam: Se usa para flujo estacionario y régimen laminar o turbulento.

Flujos Compresibles:

- rhoSimpleFoam: Se usa para flujo estacionario y régimen laminar o turbulento.
- rhoPimpleFoam: Se usa para flujo transitorio y régimen laminar o turbulento.
- sonicFoam: Se usa para flujo transitorio y régimen supersónico o transónico.

³⁶ Greenshields C. (2011-2015). OpenFOAM, The Open Source CFD Toolbox – User Guide. ESI Group.

- rhoCentralFoam: Se usa para flujo transitorio y régimen supersónico o transónico.

Flujos Multifásicos:

- InterFoam: Se usa cuando hay la interacción de dos fluidos incompresibles (VOF) bajo un régimen laminar o turbulento.
- compressibleInterFoam: Se usa cuando hay la interacción de dos fluidos compresibles (VOF) bajo un régimen laminar o turbulento.
- twoPhaseEulerFoam: Se usa para flujo multifásico con capa dispersa.

Para el análisis de la presente investigación al tener flujo bifásico (aire-agua), se utilizará el solucionador interFoam, mismo que se adapta para la resolución de las ecuaciones del Modelo RANS conjuntamente con el método Volume of Fluid (VOF), según como se indica posteriormente en el acápite 4.4.

3.2.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS AL UTILIZAR EL PAQUETE COMPUTACIONAL OpenFOAM.

VENTAJAS:

- Es un software de libre acceso, no se requiere la adquisición de licencias o derechos para su utilización.
- Los usuarios pueden modificar la estructura de los solucionadores: copiar, pegar, ejecutar, cambiar o mejorar.
- El software es recomendado para cualquier propósito ingenieril que tenga que ver con el comportamiento de los fluidos.
- Se pueden difundir modificaciones de los distintos solucionadores.
- La calidad de programación extendida en código C++ es estable, puesto que proporciona gran flexibilidad en la edición de los solucionadores, lo que garantiza un nivel adecuado en los resultados obtenidos.
- Una característica importante es la rapidez de cálculo de OpenFOAM frente a otros, ya que es posible llevar a cabo procesos de resolución en paralelo con un determinado número de procesadores.

DESVENTAJAS:

- Aún no se cuenta con la suficiente información para la resolución de los distintos casos que se presentan.
- Se presentan dificultades al tratar de conseguir recomendaciones para el correcto uso de los solucionadores y utilidades.
- Se presenta un grado de dificultad para un caso “X” al momento de incluir los archivos necesarios útiles para la correcta ejecución y funcionamiento del solucionador (solver). La deducción sobre cuales archivos deberían agregarse o eliminarse es complicada, por lo que hay que recurrir a los tutoriales o a casos similares ya resueltos y validados.

3.2.6 CONSIDERACIONES DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL OpenFOAM.

- Las estructuras de carpetas y de archivos en OpenFOAM son únicas, las cuales no pueden cambiar de nombre y no pueden estar en cualquier lado, deben estar en el sitio que están definidas al momento de realizar el paquete computacional.
- OpenFOAM usa la técnica o método de volúmenes finitos (VOF) para la discretización de las ecuaciones en cualquier malla compuesta por un número determinado de celdas.
- Este paquete computacional siempre trabaja en tres dimensiones (3D), a menos que en las condiciones de borde se especifiquen condiciones vacías (empty) para las cuales no se busquen soluciones.

3.3 CRITERIOS DE TRABAJO PARA RESOLUCIÓN NUMÉRICA.

OpenFOAM al ser un paquete de software libre de Dinámica de Fluidos Computacional, se caracteriza principalmente por permitir la creación y modificación de solvers. La discretización que emplea OpenFOAM en las ecuaciones se basa en el método de volúmenes finitos.

Los CFD son una rama de la mecánica de fluidos que emplean métodos numéricos para resolver las ecuaciones que gobiernan el flujo:

- Conservación de la masa.
- Conservación del momento.
- Conservación de energía.

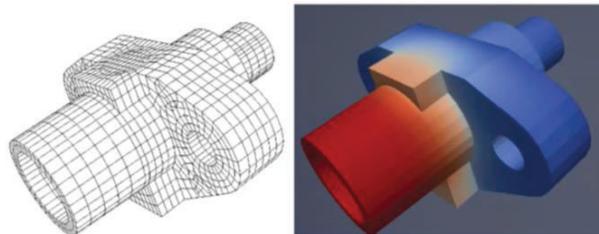
3.3.1 PROCESO DE DISCRETIZACIÓN.

Según Hernández, (2014) el proceso de discretización consiste en dividir la zona o dominio de cálculo en el que se pretende estudiar el comportamiento del fluido en numerosos pequeños volúmenes o celdas, donde se tendrá ecuaciones gobernantes que deberán ser resueltas para dar solución a los modelos. En CFD existen tres tipos de discretización:

- Discretización Espacial o de dominio
- Discretización de ecuaciones
- Discretización temporal.

El proceso de discretización espacial o de dominio consiste dividir el dominio computacional en un gran número de elementos más pequeños, que darán lugar a la malla. Es importante que la malla no tenga vacíos o agujeros y no deben superponerse.

FIGURA No. 3. 3: DISCRETIZACIÓN ESPACIAL O DE DOMINIO.



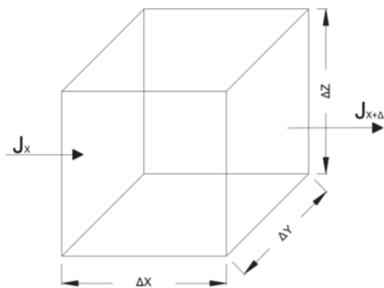
FUENTE: Lamas, M. I., & Rodríguez, C. G. (2014a). CFD with OpenFOAM. Chapter 1: Computational Fluid Dynamics (CFD). España: Technical Courses. Norplan S.C.

La discretización de ecuaciones consiste en pasar las ecuaciones diferenciales que gobiernan el flujo en ecuaciones algebraicas, donde las soluciones de las ecuaciones algebraicas se aproximan a la solución de las ecuaciones diferenciales.

En mecánica de fluidos la conservación de las propiedades más relevantes de un fluido dentro de un volumen de control significa el equilibrio entre varios procesos.

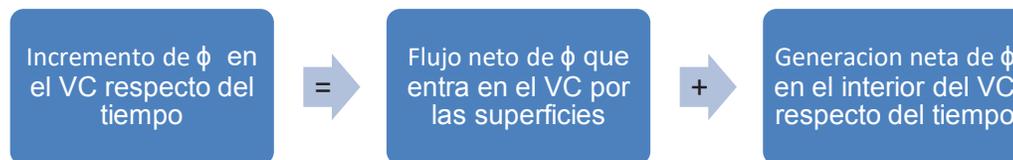
Se considera una variable específica ϕ , que está definida por un volumen de control de dimensiones Δx , Δy , Δz como se puede observar en la FIGURA No. 3. 4 y mediante la FIGURA No. 3. 5 se puede expresar la variación temporal de la variable ϕ en un volumen de control.

FIGURA No. 3. 4: DIMENSIONES EN UN VOLUMEN DE CONTROL.



FUENTE: Fernández, J. (2012). Técnicas Numéricas en Ingeniería de Fluidos. Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos. Barcelona.: Reverté.

FIGURA No. 3. 5: VARIACIÓN TEMPORAL DE LA VARIABLE ϕ .



FUENTE: Fernández, J. (2012). Técnicas Numéricas en Ingeniería de Fluidos. Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos. Barcelona.: Reverté.

Ecuación general de transporte:³⁷

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho\phi u)} = \underbrace{\nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi)} + \underbrace{S_\phi} \quad (3. 1)$$

Término transitorio Término convectivo Término difusivo Término fuente

Término transitorio. - Es la variación temporal de la variable ϕ por unidad de volumen.

Término convectivo. - Es el balance neto de flujo de la variable ϕ en el volumen de control a consecuencia de la velocidad.

Término difuso. - Es el balance de ϕ flujos debido al gradiente de ϕ .

Término fuente. - Es la generación de ϕ por unidad de volumen.

Las ecuaciones que rigen en la mecánica de fluidos, tienen elementos comunes que se expresa mediante la ecuación de transporte. Donde ϕ es una variable general de forma conservativa que puede representar los principios de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía.

Donde

τ : es el coeficiente de difusión de ϕ .

ρ : es la densidad.

\vec{u} : es el vector velocidad.

³⁷ Lamas, M. I., & Rodríguez, C. G. (2014a). CFD with OpenFOAM. Chapter 1: Computational Fluid Dynamics (CFD). España: Technical Courses. Norplan S.C.

Tabla No. 12: VARIABLES QUE INTERVIENEN EN LA SUSTITUCIÓN DE LA ECUACIÓN DE TRANSPORTE.

Ecuación de conservación	Φ	Υ	S_ϕ
Masa	1	0	0
Momento en X	u	μ	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot u \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial p}{\partial x}$
Momento en Y	v	μ	$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot u \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial p}{\partial y}$
Momento en Z	w	μ	$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot u \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial z}$
Energía	T	$\frac{k}{C_p}$	0

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FUENTE: Lamas, M. I., & Rodríguez, C. G. (2014a). CFD with OpenFOAM. Chapter 1: Computational Fluid Dynamics (CFD). España: Technical Courses. Norplan S.C.

La discretización temporal se aplica a problemas transitorios (que varían en el tiempo). Los problemas estacionarios no necesitan ser discretizados, donde la discretización consiste en dividir el tiempo en intervalos llamados paso de tiempo.

3.3.2 DISCRETIZACIÓN DEL SISTEMA ALGEBRAICO DE ECUACIONES.³⁸

Entre los principales métodos de discretización están los siguientes: método de diferencias finitas (FDM), método de elementos finitos (FEM) y métodos de volúmenes finitos (MVF).

3.3.2.1 MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS.

El método de diferencias finitas aproxima las derivadas en las ecuaciones diferenciales de gobierno por su expresión truncada en series de Taylor. Para tener una mejor comprensión del concepto se considera la siguiente ecuación.

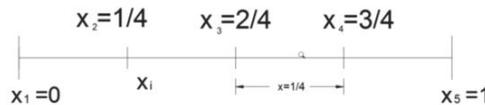
³⁸ Fernández, J. (2012). Técnicas Numéricas en Ingeniería de Fluidos. Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos. Barcelona.: Reverté.

$$\frac{d\phi}{dx} + \phi = 0 \quad ; \quad 0 \leq x \leq 1 \quad ; \quad \phi(0) = 1 \quad (3. 2)$$

Al discretizar la ecuación anterior según el dominio unidimensional de la FIGURA No. 3. 6 que tiene 5 nodos equiespaciados a una Δx entre nodos consecutivos se obtiene la siguiente expresión válida para cualquier punto del dominio.

$$\left(\frac{d\phi}{dx} \right)_i + \phi_i = 0 \quad (3. 3)$$

FIGURA No. 3. 6: DISCRETIZACIÓN CON 5 NODOS.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FUENTE: Fernández, J. (2012). Técnicas Numéricas en Ingeniería de Fluidos. Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos. Barcelona.: Reverté.

3.3.2.2 MÉTODO DE LOS VOLÚMENES FINITOS.

Debido que resolver las ecuaciones diferenciales que rigen en mecánica de fluidos es muy complicado, es necesario utilizar otros métodos numéricos para encontrar una solución como son: diferencias finitas, elementos finitos y volúmenes finitos, el propósito de estos métodos es convertir los sistemas de ecuaciones diferenciales parciales en ecuaciones algebraicas, de esta manera sea posible encontrar una solución de las ecuaciones (Londoño, 2008).

OpenFOAM utiliza el método de resolución numérica basado en volúmenes finitos para encontrar las soluciones de las ecuaciones de conservación a través de la integración.

El método de volúmenes finitos consiste en dividir el dominio de estudio en n número de celdas o volúmenes cuyo centroide representa la conservación de la

variable ϕ de manera discreta. El centro de los volúmenes representa los nodos de cálculo donde se presentarán las ecuaciones de conservación a ser resueltas y los valores de las variables que se encuentran en las superficies de los volúmenes se expresan en términos de valores nodales utilizando la interpolación para encontrar la solución.

El dominio de cálculo tendrá tantas ecuaciones como nodos, mientras más pequeños sean los volúmenes, mayor será el esfuerzo computacional que se necesitará para resolver el dominio completo.

FIGURA No. 3. 7: ESQUEMA DE MALLA FINA Y MALLA MUY GRUESA.

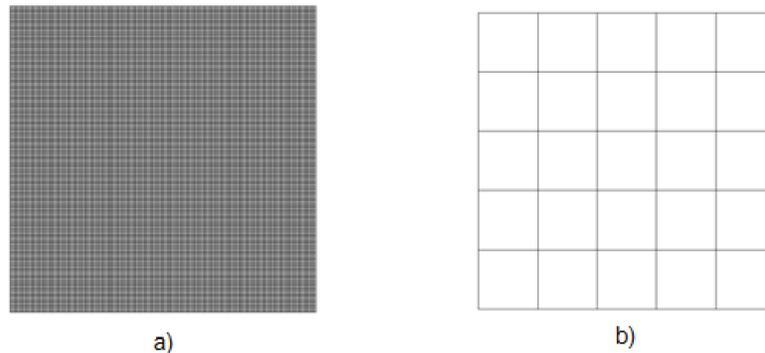


Figura 1.4-2 Malla a) demasiada fina y b) muy gruesa

FUENTE: Villamizar A., (2014). Discretización espacial de dominio. Aplicación de un modelo turbulento bidimensional para la simulación de flujo a superficie libre en un canal horizontal. (p. 30). Bogotá. Colombia.: Universidad Nacional de Colombia.

Para poder aplicar en el método de volumen finito es necesario integrar la ecuación de transporte en cada volumen de control quedando de la siguiente manera.

$$\int_{VC} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_{VC} \nabla \cdot (\rho\phi\vec{u}) dV = \int_{VC} \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) dV + \int_{VC} S_\phi \quad (3. 4)$$

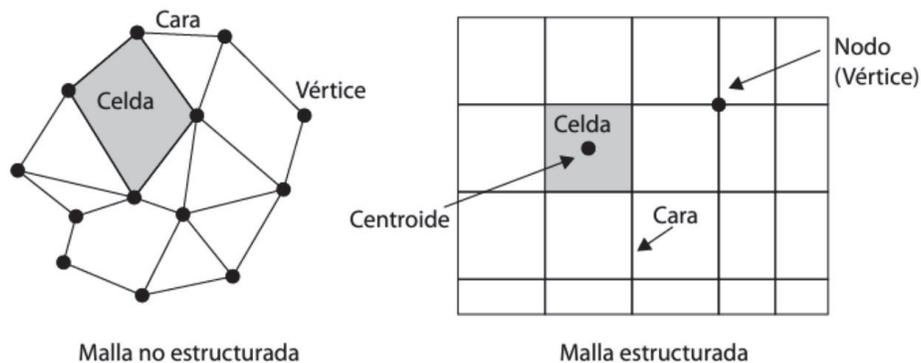
Las mallas se componen de nodos, caras y celdas, las mallas pueden ser estructuradas y no estructuradas, en el método de volúmenes finitos se puede utilizar cualquiera de estos tipos de mallas

Las **mallas estructuradas** son aquellas que están formadas por un conjunto de nodos o volúmenes de control bien definidos que se los identifica mediante grupos de índices ordenados (i, j, k) en el caso de tener 3D e (i, j) en el caso de tener 2D. La retícula de celdas se constituye por una red de familias de líneas coordenadas. Una de las desventajas de estas mallas es que en geometrías curvas no adoptan de mejor manera la forma del dominio.

Las mallas estructuradas frente a las no estructuradas, presentan mejores prestaciones de cálculo, memoria computacional y precisión numérica (Lara, 2015).

Las **mallas no estructuradas** generalmente se utilizan en estructuras de geometría o dominio de cálculo complejos. Para los tramos curvos, es mejor utilizar el mallado no estructurado triangular o tetraédrico. Este tipo de mallas no tienen ningún patrón ni dirección por lo que su precisión numérica y capacidad computacional no son los más óptimos.

FIGURA No. 3. 8: CATEGORIAS DEL MALLADO.



FUENTE: Fernández, J. (2012). Técnicas Numéricas en Ingeniería de Fluidos. Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos. Barcelona.: Reverté.

3.3.2.3 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.

Al igual que el método de volúmenes finitos, todo el dominio de estudio se divide en pequeños volúmenes a diferencia del método anterior se multiplica con la ecuación del peso en todo su dominio. Este es un método funcional de toda la solución numérica, las diferentes variables son resueltas como la combinación lineal de diferentes funciones continuas v_i .

$$\phi = \sum_{i=1}^N \phi_i v_i \quad (3. 5)$$

3.4 MÉTODOS DE CÁLCULO PARA FLUJOS TURBULENTOS EN OpenFOAM.³⁹

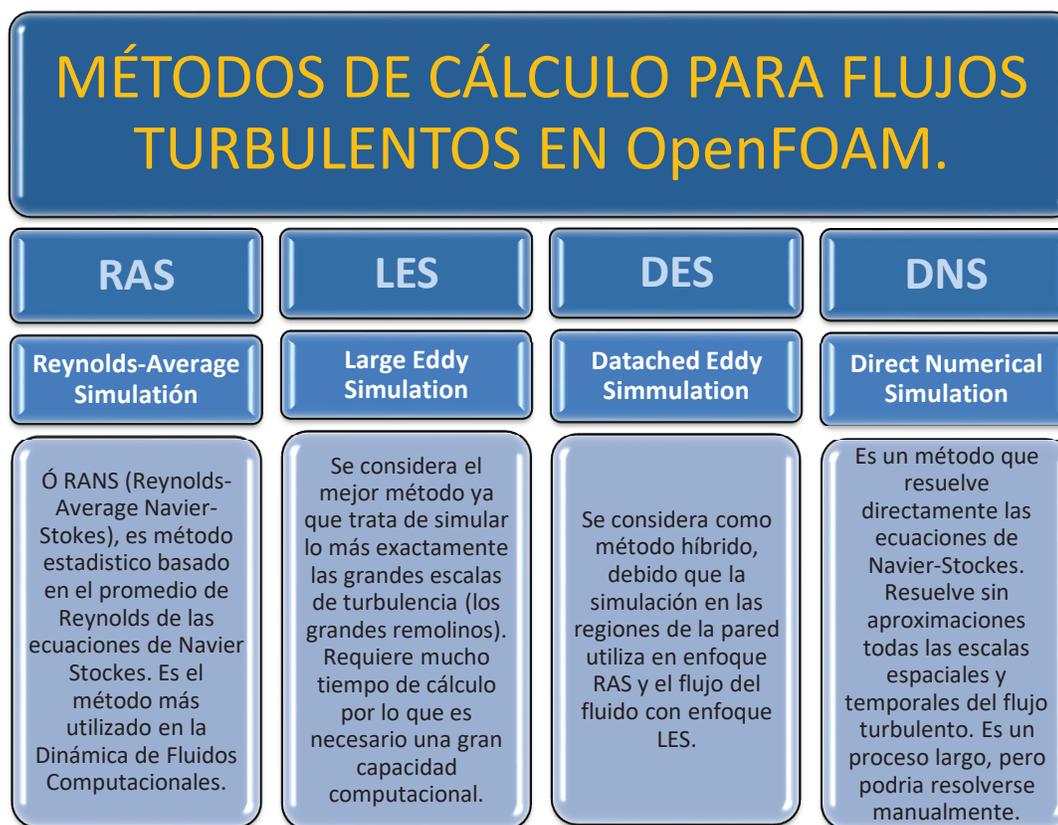
OpenFOAM incluye los siguientes métodos de cálculo para flujos turbulentos:

- RAS (Reynolds-Average Simulación).
- LES (Large Eddy Simulation).
- DES (Datached Eddy Simmulation).
- DNS (Direct Numerical Simulation).

En la siguiente figura se presenta un esquema de los usos de cada método.

³⁹ Pineida P. & Gonzáles (2012). Validación del software OpenFOAM en flujo turbulento: Aplicación artística del movimiento aleatorio, JIFI – EAI2012. Universidad Central de Venezuela, Venezuela.

FIGURA No. 3. 9: ESQUEMA DE LOS MÉTODOS DE CALCULO PARA FLUJOS TURBULENTOS EN OpenFOAM.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FUENTE: Pineida P. & Gonzáles R. (2012). Validación del software OpenFOAM en flujo turbulento: Aplicación artística del movimiento aleatorio, JIFI – EAI2012. Universidad Central de Venezuela, Venezuela.

3.5 MODELOS DE TURBULENCIA RECOMENDADOS PARA LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.

El método de cálculo para flujos turbulentos a emplearse en la simulación de la presente investigación es el Método Reynolds Average Navier – Stokes (RANS), dado que dentro de este modelo se encuentran los modelos de turbulencia de dos ecuaciones como son: $k-\epsilon$, $k-\omega$ y $k-\omega$ SST, entre éstos se escogió el modelo de turbulencia $k-\omega$ SST como se indica en el acápite 4.5.

3.6 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR UNA SIMULACIÓN NUMÉRICA EN OPENFOAM.

Para efectuar una simulación numérica hay distintas metodologías o procedimientos, a continuación, se realiza una propuesta:

1) Pre procesamiento:

- Conocer las condiciones físicas del fluido, tipo de fluido y si tiene contacto con algún otro fluido.
- En el aspecto espacial se debe tener claro la geometría y forma de la estructura que se modelará para definir los límites del dominio.
- Definir el solver adecuado a la condición del fluido, del objeto de estudio y de la geometría del dominio y de las capacidades del paquete computacional.
- Generación de la malla, refinamiento de la malla y discretización del dominio. Se definen las dimensiones y contorno del modelo, se crea el archivo blockMeshDict, determinación de coordenadas cartesianas para establecer los nodos al generar la malla con la plantilla BlockMesh, y se realiza el chequeo de la malla con checkMesh para garantizar la calidad de la misma.
- Ingreso de condiciones de borde, definición de contorno sólidos, contornos móviles o a la atmosfera, secciones de entrada y salida del flujo. Se define en el archivo blockMeshDict, y puede verse con más claridad en el archivo Boundary posteriormente de haber generado el mallado.
- La definición de condiciones iniciales, se lo hace en la carpeta "0" dependiendo de las variables que se tenga, existirá un archivo para cada uno.

2) Procesamiento:

- Para realizar la implementación del modelo es recomendable tener por separado las carpetas que se van a usar para la ejecución del problema (Time, Constant, System). Las carpetas deberán estar verificadas.

- La malla deberá estar con sus condiciones iniciales ya asignadas, esto quiere decir que las superficies del dominio estarán correctamente nombradas de acuerdo con las características del problema a simular.
- Para el proceso de cálculo se debe llamar en la aplicación “terminal” al solucionador de OpenFOAM que se utilizará.

3) Post procesamiento:

- Se realizará la interpretación de resultados por medio de la aplicación ParaView.

Se recomienda al lector revisar el APÉNDICE D donde se explica los pasos realizados para calibrar el modelo numérico.

3.7 CONDICIONES DE FRONTERA.

Las condiciones de frontera tienen como finalidad realizar la calibración del modelo, permitiendo definir el comportamiento del flujo en contacto con las superficies que conforman la geometría o dominio en el problema planteado. Es necesario definir las antes de comenzar la simulación teniendo seguridad de que los datos ingresados y la configuración de los mismos son coherentes debido que el ingreso de información errónea afectaría los resultados finales.

Las condiciones de frontera se dividen en:

- Condiciones de Frontera Numéricas. - Son valores fijos que poseen las variables en la frontera y los gradientes de la variable, estos son:
 - 1) Fixed Value (Dirichlet). - Determina el valor de la variable dependiente en la frontera.
 - 2) Fixed Gradient (Neumann). - Determina el gradiente de la variable en la frontera.

- Condiciones de Frontera Físicas. - Son las condiciones que se les da a cada nombre de superficie que conforman el contorno de la estructura en estudio, tales como planos de simetría, paredes, atmósfera, entrada y salida.

CAPÍTULO 4

MODELACIÓN NUMÉRICA DE UNA RÁPIDA DE CONTORNO LISO UTILIZANDO EL PAQUETE COMPUTACIONAL OpenFOAM.

4.1 GEOMETRÍA DEL MODELO NUMÉRICO.

4.1.1 DESCRIPCIÓN.

La estructura hidráulica de la cual se realizará la simulación numérica en el paquete computacional OpenFOAM corresponde a la estructura utilizada para el ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO DE LAS OBRAS DE DERIVACIÓN Y DESVIO DE LA QUEBRADA EL BATÁN, estudios que fueron realizados en la ESCUELA POLITECNICA NACIONAL. La escala del modelo correspondiente a la estructura antes mencionada es de 1:25 respecto al prototipo.

4.1.2 MODELO HIDRÁULICO.

El modelo Hidráulico a escala 1:25 está conformado de 3 partes.

- Estructura de alimentación.
- Zona de modelación.
- Estructura de restitución.

La estructura de alimentación consta de un sistema de bombeo que eleva el agua hasta el nivel de ingreso a la transición de la estructura.

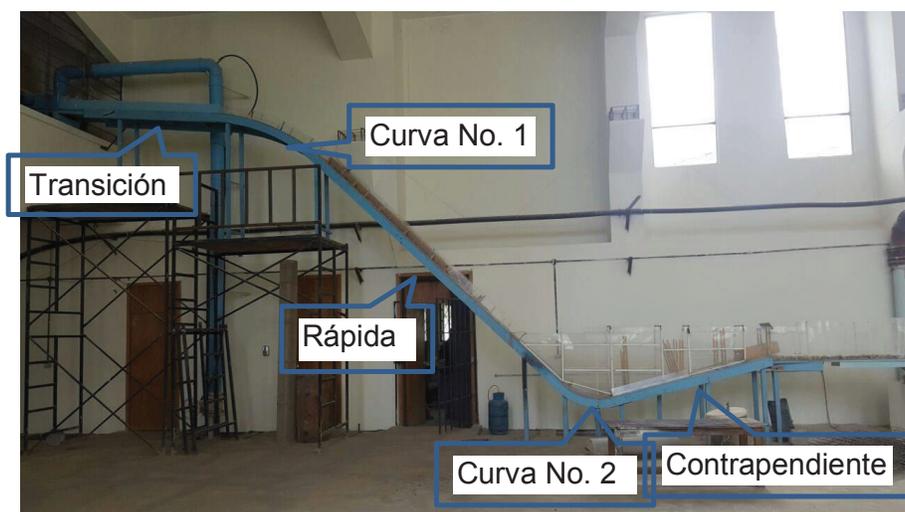
La zona de modelación está formada por una transición, curva vertical No. 1, sección de la rápida de $l=100\%$, colchón amortiguador y el cauce corregido.

La estructura de restitución se constituye de un tanque de recolección con el fin de reducir la turbulencia y entregar el caudal a la quebrada lo más uniforme posible.

Se hará mayor énfasis en la modelación numérica del canal de fuerte pendiente (rápida) con una inclinación de 45° ($I= 100\%$).

La estructura consiste en un canal rectangular de $B=0.40\text{m}$ y $H=0.20\text{m}$ de las paredes, conformado de 3 secciones: una de ingreso con pendiente $I=10\%$, la rápida de pendiente $I=100\%$ y el cuenco disipador con un plano inclinado y contrapendiente $I=25\%$ como se observa en la Fotografía No 5.

Fotografía No. 6: MODELO FÍSICO EN EL LABORATORIO (Escala 1:25).

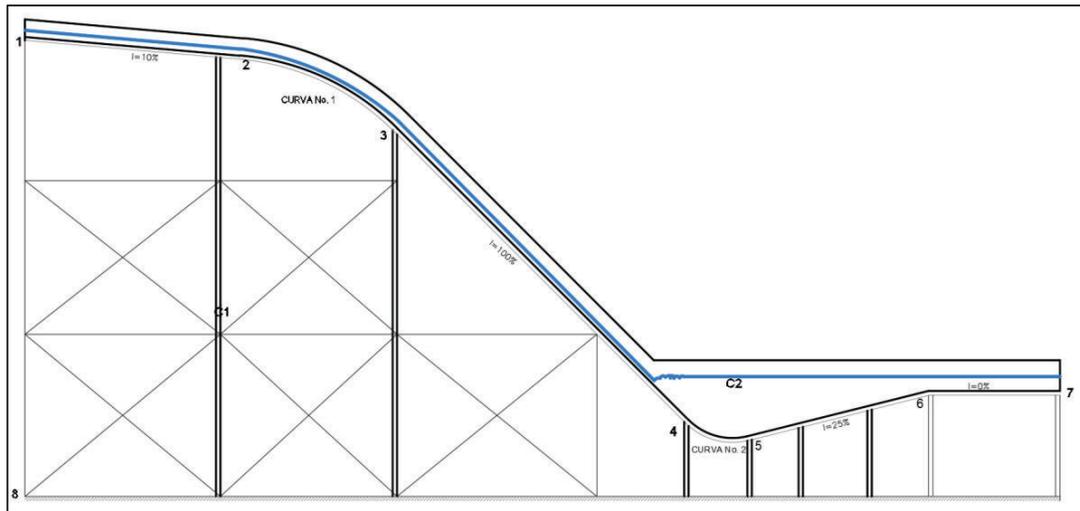


4.1.3 ELABORACIÓN DE LA GEOMETRÍA.

En toda modelación de CFD es primordial fijar las condiciones iniciales y de frontera o contorno para definir y acotar el dominio de estudio de un modelo numérico. Las condiciones iniciales son el punto de partida de las ecuaciones de flujo.⁴⁰

Con las medidas obtenidas en campo mediante replanteo a cinta y datos de radio de las curvas 1 y 2 obtenidas del proyecto del ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO DE LAS OBRAS DE DERIVACIÓN Y DESVIO DE LA QUEBRADA EL BATÁN, la construcción de la geometría en 2D fue desarrollado en el Software AutoCAD.

⁴⁰ Fernández, J. (2012). Técnicas Numéricas en Ingeniería de Fluidos. Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos. Barcelona.: Reverté.

FIGURA No. 4. 1: GEOMETRIA DEL DOMINIO DE ESTUDIO (2D).

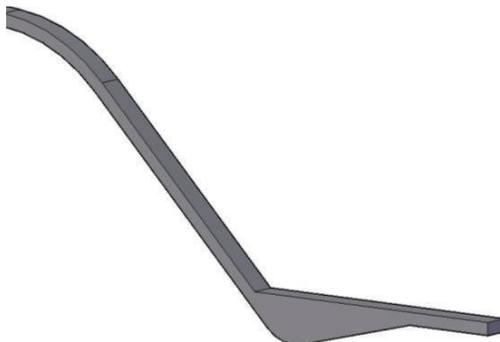
REALIZADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

Una vez realizada la geometría 2D, se realiza una extrusión de 0.40 m para dar lugar al sólido de ejes coordenados X, Y, Z. La longitud de la estructura se representa en el eje X, la altura en el eje Y y el ancho del canal en el eje Z tal como se puede observar en la FIGURA No. 4. 2. Posteriormente se realiza la exportación con el formato (.iges)⁴¹ al paquete computacional Salome-Meca que es un software de licencia libre, donde se puede realizar un pre proceso de creación de mallas.

El programa GMSH brinda la ayuda en la elaboración de mallas estructuradas y no estructuradas al igual que Salome-Meca, este programa se debe ingresar coordenadas de la geometría a diferencia de salome que también se puede ingresar la geometría como sólido.

Para la representación de la geometría en el programa GMSH, fueron útiles los puntos obtenidos de la geometría 2D, y para darle profundidad (3D) se aplica una extrusión con un valor de 0.40 m, FIGURA No. 4. 2.

⁴¹ Formato de archivo informático que define un formato neutral de datos que permite el intercambio digital de información entre sistemas de diseño asistido por computadora (CAD).

FIGURA No. 4. 2: GEOMETRIA 3D DEL DOMINIO DE ESTUDIO

REALIZADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

4.2 ELABORACIÓN DEL MALLADO DEL DOMINIO DE ESTUDIO.

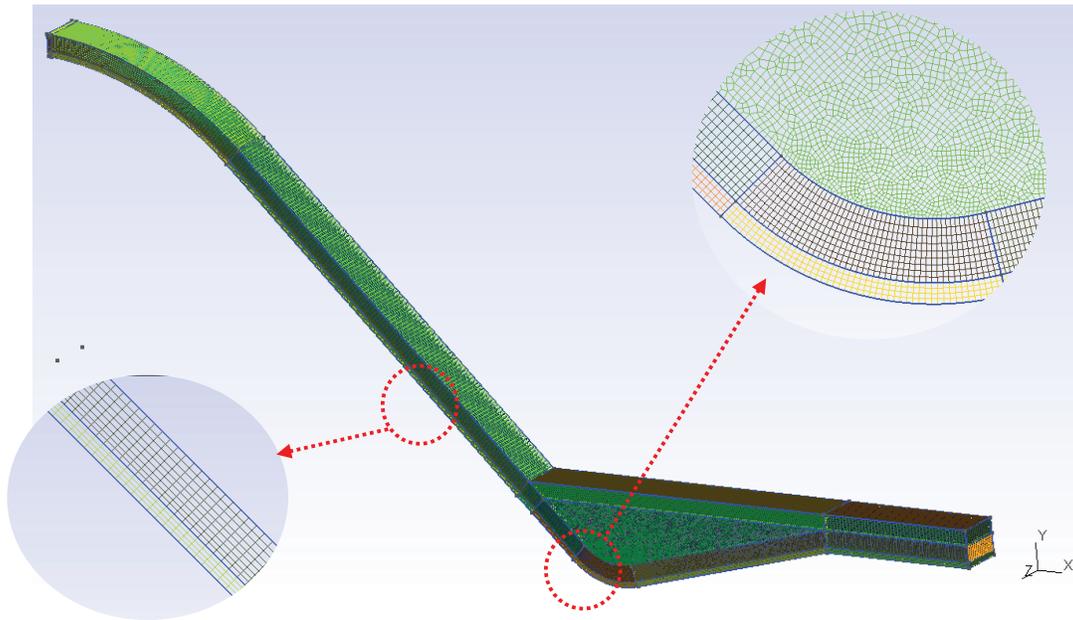
En CFD es muy importante tener en cuenta una geometría bien definida y una malla de buena calidad; debido que el resultado de la simulación dependerá en un alto porcentaje de la calidad de malla. Para el presente estudio se utilizó dos alternativas en tipo de malla; no estructurada (tetraédrico) para plan de pruebas y malla mixta (hexaedros y tetraedros) para las simulaciones definitivas, ya que es posible realizar mallas estructuradas por secciones. Recomendación del Dr. Víctor Hugo Hidalgo especialista de la Escuela Politécnica Nacional en CFD.

La malla no estructurada se realizó en el paquete computacional Salome-Meca⁴², por su facilidad y tiempo muy corto que brinda en la elaboración este tipo de malla, se utilizó para configurar el modelo con sus respectivas condiciones iniciales para la simulación numérica.

La malla mixta se elaboró en al programa GMSH (FIGURA No. 4.3) para asegurar una malla de buena calidad y con la finalidad de obtener convergencia por las características del modelo físico. Se invita al lector a revisar el APÉNDICE B para una breve revisión de la elaboración de mallas en GMSH.

⁴² Plataforma genérica para pre y post procesamiento para simulación numérica de código abierto.

FIGURA No. 4. 3: ESQUEMA DE MALLA MIXTA ELABORADA EN GMSH.



REALIZADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

4.2.1 EXPORTACIÓN DE LA MALLA A FORMATO LEGIBLE POR OpenFOAM desde GMSH.

Para poder utilizar una malla elaborada dentro del programa GMSH hay que realizar la debida exportación a un formato legible por OpenFOAM. Para el proceso hay que realizar las siguientes actividades:

- 1) Pegar el archivo de extensión. msh creado en GMSH dentro de la carpeta del CASO en estudio.
- 2) Abrir el terminal y direccionar la carpeta del caso de estudio.
- 3) Una vez dentro de la carpeta del caso en estudio se escribe el comando:
`gmshtofoam name.msh`
 Donde "name" es el nombre que se le dio al archivo creado en GMSH y .msh la extensión.

4.2.2 CARACTERISTICAS DE LA MALLA.

Orthogonal Quality es un parámetro que se utiliza para verificar que el mallado tenga la calidad mínima requerida para ser implementada sin problemas de convergencia. También revisa la calidad del elemento más desfavorable en la malla, teniendo en cuenta que un único elemento lleva a divergencia del solver. En un elemento perfecto (cubo o prisma con todas sus aristas iguales) Orthogonal Quality es 1, un elemento de mala calidad tendrá un valor muy inferior o muy superior a 1. El rango recomendado de los valores es de 1 a 3.

4.2.3 CALIDAD DE MALLA.

Es importante tener una malla de buena calidad para ello existen criterios que se deben cumplir como son los siguientes: no-ortogonalidad, simetría, relación de aspecto, estos valores se los puede observar en el terminal de Ubuntu ejecutando el comando `checkMesh` posterior a la exportación de la malla a formato OpenFOAM. En la FIGURA No. 4. 4 se puede observar los criterios antes mencionados en el chequeo de la malla.

FIGURA No. 4. 4: CATEGORIAS DEL MALLADO DESDE EL TERMINAL.

```
Create polyMesh for time = 0
Time = 0
Mesh stats
  points:          173440
  faces:           485202
  internal faces:  451398
  cells:           156105
  faces per cell:  5.99981
  boundary patches: 6
  point zones:    0
  face zones:     0
  cell zones:     1
Overall number of cells of each type:
  hexahedra:      156075
  prisms:         30
  wedges:         0
  pyramids:       0
  tet wedges:     0
  tetrahedra:     0
  polyhedra:      0
```

```

Checking topology...
Boundary definition OK.
Cell to face addressing OK.
Point usage OK.
Upper triangular ordering OK.
Face vertices OK.
Number of regions: 1 (OK).

Checking patch topology for multiply connected surfaces...
Patch      Faces   Points  Surface topology
walls      20814  21680   ok (non-closed singly connected)
atmosphere 6045   6464   ok (non-closed singly connected)
inletWater 60      80     ok (non-closed singly connected)
bottomr    4440   4752   ok (non-closed singly connected)
bottom     2145   2304   ok (non-closed singly connected)
outlet     300    336    ok (non-closed singly connected)

Checking geometry...
Overall domain bounding box (2.4468 0.663672 -0.4) (11.797 5.2184 0)
Mesh has 3 geometric (non-empty/wedge) directions (1 1 1)
Mesh has 3 solution (non-empty) directions (1 1 1)
Boundary openness (1.31073e-15 -9.22174e-17 3.10019e-18) OK.
Max cell openness = 2.47176e-16 OK.
Max aspect ratio = 9.9334 OK.
Minimum face area = 4.93797e-05. Maximum face area = 0.00106707. Face area magnitudes OK.
Min volume = 1.31676e-06. Max volume = 2.83875e-05. Total volume = 1.50327
Cell volumes OK.
Mesh non-orthogonality Max: 59.0087 average: 7.8914
Non-orthogonality check OK.
Face pyramids OK.
Max skewness = 1.93364 OK.
Coupled point location match (average 0) OK.

Mesh OK.

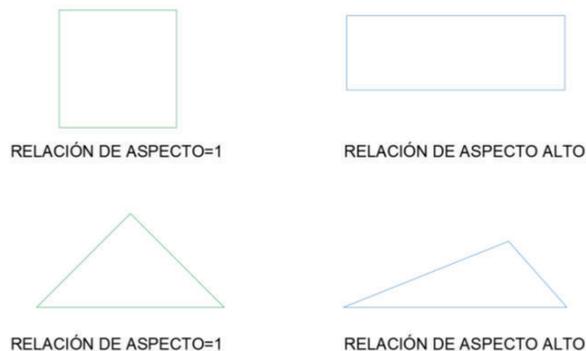
```

REALIZADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

Relación de aspecto. - es la relación entre los lados de mayor tamaño con la celda de menor tamaño, donde se calcula con la Ec. 4. 1, la relación de aspecto cercano a uno es de muy buena calidad.

$$r_{asp} = \frac{\max(\partial x, \partial y)_{celda}}{\min(\partial x, \partial y)_{celdas}} = 1 \quad (4. 1)$$

FIGURA No. 4. 5: CATEGORIAS DEL MALLADO DESDE EL TERMINAL.

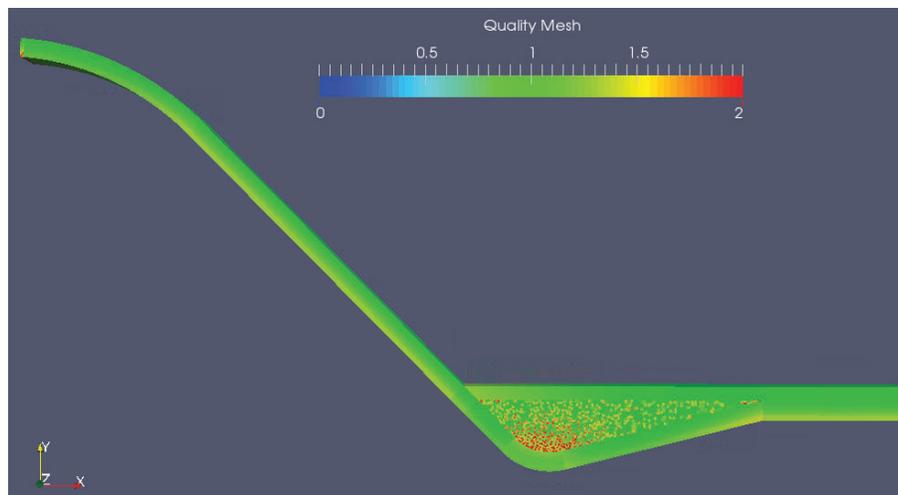


REALIZADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

Todas las categorías mencionadas deben cumplir los rangos de calidad, al tener una malla de mala calidad se pueden tener soluciones con resultados erróneos, tiempos extremadamente largos de simulación y sin convergencia.

En la FIGURA No. 4. 6 se puede observar la calidad de malla chequeada en el programa ParaView, donde los valores deben estar en el rango de 1 a 3 para tener una malla de buena calidad, como se observa en el grafico se tiene valores máximos de 2 entonces se tiene una malla de buena calidad.

FIGURA No. 4. 6: “MESH QUALITY” EN PARAVIEW.



REALIZADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

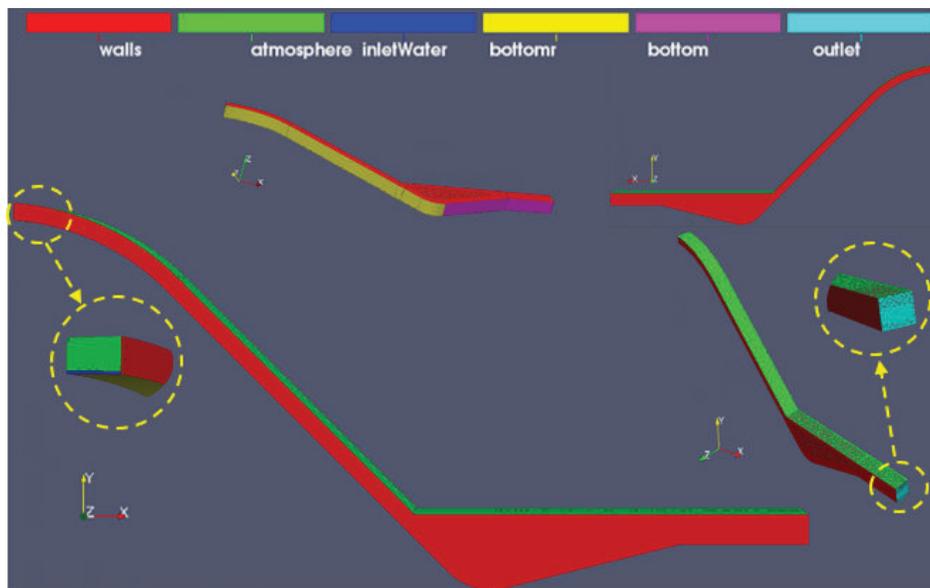
4.3 CONDICIONES DE FRONTERA DEL MODELO NUMÉRICO.⁴³

Los límites del dominio o frontera están conformados por la serie de caras o superficies que componen la malla computacional. La definición correcta y coherente de las condiciones de frontera es fundamental para acotar el problema numérico y obtener resultados válidos, puesto que para el caso de fluidos debe satisfacer el principio de continuidad.

⁴³ Jasak H. (1996). Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Applications to Fluids Flows, Thesis submitted for the Degree of Doctor of the University of London. London - England.

En la FIGURA No. 4.7 se representa gráficamente las condiciones de contorno del dominio de estudio. Los colores rojos representan las paredes fijas, el color verde la superficie abierta a la atmosfera, el color azul es el ingreso de agua y el celeste la salida. Los colores amarillo y rosado representan el fondo de la estructura.

FIGURA No. 4. 7: CONDICIONES DE FRONTERA EN LA ESTRUCTURA DE ESTUDIO.



REALIZADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

- Entrada (inlet).- Se define el campo de velocidades y la condición de frontera para la presión es gradiente cero.
- Salida (outlet).- Para la condición de salida el balance de masa global dentro del dominio debe cumplirse (Continuidad). Una alternativa sería establecer el gradiente de presión con valor cero.
- Pared sólida (wall).- Para establecer una condición de pared sólida se toma las consideraciones que es impermeable y antideslizante. La velocidad del flujo sobre la pared es similar a la de la pared por lo que la condición de contorno sería con un valor cero. Sabiendo que el flujo a través de la pared es cero, al gradiente de presión también le corresponde un valor de cero.

- Plano de simetría (symmetry plane).- Desde el interior del dominio las componentes paralelas al plano se proyectan hacia la cara de frontera de simetría, donde los gradientes normales sobre la superficie de simetría son cero.

Para el dominio de la presente investigación en el paquete computacional OpenFOAM las condiciones de frontera se deben aplicar a todas las superficies de la geometría, tal como en las paredes, en el ingreso, en la salida, en el fondo, y condiciones atmosféricas en caso de haberlas y para cada campo que se vaya a calcular.

4.4 SELECCIÓN DEL SOLUCIONADOR (SOLVER) PARA FLUJO BIFÁSICO Y CONSIDERACIONES TEÓRICAS.

Al tener alta interacción entre agua y aire (flujo bifásico) se ha optado por un solucionador validado y probado de OpenFOAM llamado interFoam, mismo que utiliza un enfoque matemático volumen de fluidos (VOF) en la resolución de las ecuaciones. Resuelve las ecuaciones de modelos de turbulencia mediante metodología RANS.

El solucionador interFoam se caracteriza por su capacidad de trabajo con flujos multifásico, los cuales se definen por ser incompresibles, isotérmicos e inmiscibles.

4.4.1 PARÁMETROS DE FASE.

En canales abiertos (flujo a superficie libre) como en el caso de la presente investigación, se presenta la interacción de agua con aire conformando fases de líquido y gas (flujo multifásico) circulante a través de la estructura.

Hirt y Nicholls (1981) propusieron el método VOF, el cual considera la interacción agua – aire para la resolución de las ecuaciones. El método se basa en definir una función que indica si una celda está ocupada por un fluido (líquido o gas) o por la mezcla de ambos.

Como parámetro de fase para saber que porción de la celda está ocupada por un fluido o por ambos es alpha (α), donde:

- 1) Si, $\alpha(x, y, z, t) = 1$, corresponderá al volumen ocupado por el fluido 1. Para la presente investigación corresponderá al volumen de agua.
- 2) Si, $\alpha(x, y, z, t) = 0$, corresponderá al volumen ocupado por el fluido 2. Para la presente investigación corresponderá al volumen de aire.
- 3) Si, $0 < \alpha(x, y, z, t) < 1$, corresponderá a una zona de interface (mezcla de agua y aire).

Para dos fluidos newtonianos e incompresibles el método Volume of Fluid (VOF) resuelve las ecuaciones RANS en simultáneo con la ecuación de transporte para fracción de volumen para una fase a través de la expresión:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (U\alpha) = 0 \quad (4. 2)$$

Para cada fase la fracción volumétrica se podría resolver de manera separada con un enfoque Euleriano según Romagnoli (2009), mediante las expresiones:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (U_1\alpha) = 0 \quad (4. 3)$$

$$\frac{\partial (1-\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot [(U_2(1-\alpha))] = 0 \quad (4. 4)$$

La densidad y viscosidad son propiedades locales de los fluidos, las cuales se consideran una mezcla entre las mencionadas propiedades de los fluidos siendo iguales a:

$$\rho = \alpha\rho_1 + (1-\alpha)\rho_2 \quad (4. 5)$$

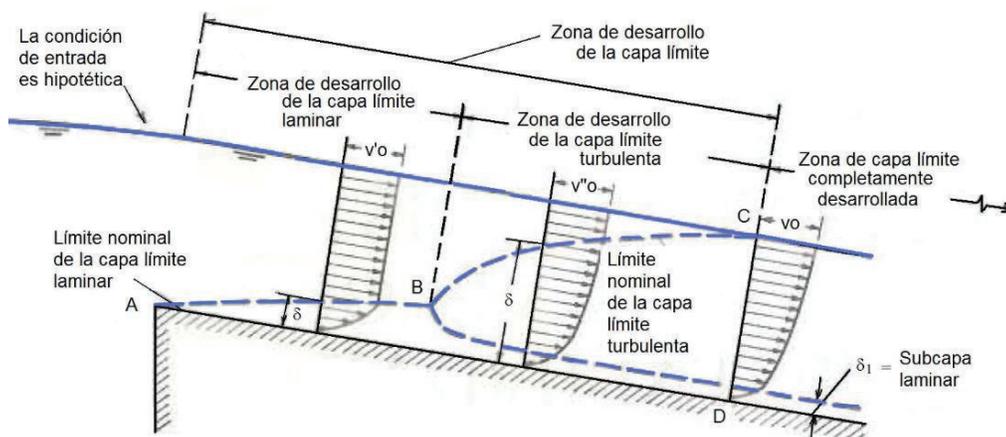
$$\mu = \alpha\mu_1 + (1-\alpha)\mu_2 \quad (4.6)$$

4.4.2 FLUJO EN LA CAPA LÍMITE.

Según, (FERNANDEZ, 2012) se denomina la capa límite como “la zona del campo de fluido que está próximo a un contorno sólido en el que se manifiestan los efectos viscosos”.

Para la presente investigación la capa límite se presentará en la zona que este en contacto con el fondo del canal, en estas zonas aparece el gradiente de velocidad en la dirección normal al contorno sólido, debido a la viscosidad y la condición de pared (no deslizamiento). En la FIGURA No 4.8 se puede observar las distintas etapas de capa laminar.

FIGURA No. 4. 8: CONDICIÓN DE CAPA LÍMITE PARA UN CANAL A SUPERFICIE LIBRE.



FUENTE: Ven Te Chow. (1994). *Conceptos teóricos de capa límite, rugosidad superficial, distribución de velocidades e inestabilidad de flujo uniforme*. En Hidráulica de Canales Abiertos. (p. 190). Colombia.: Mc Graw Hill.

4.4.3 FUNCIONES DE PARED

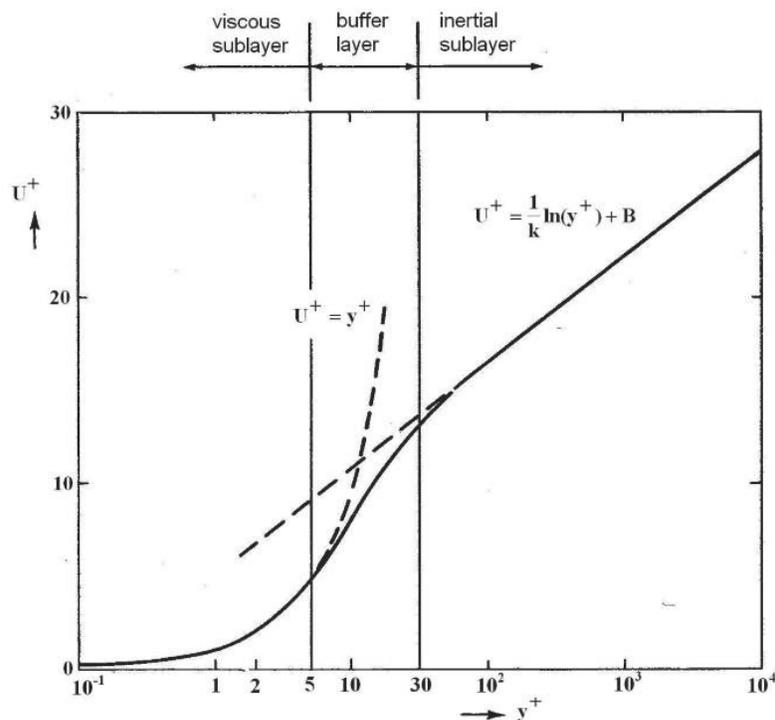
En una simulación numérica es fundamental refinar la malla cerca a la pared para tener una mejor representación de los resultados. En esta investigación el estudio

se centra en el comportamiento del flujo a lo largo del canal de fuerte pendiente mediante la variación de la altura de rugosidad k_s .

Según, (Lumley, 1972) la capa límite se divide en tres regiones:

- Subcapa Viscosa (viscous sublayer) $0 < y^+ < 5$.
- Capa de Amortiguación (buffer layer) $5 < y^+ < 30$.
- Subcapa Inercial (inertial sublayer) $30 < y^+ < 200$.

FIGURA No. 4. 9: LEY DE LA PARED.



FUENTE: Vladislav E. (2006). *Wall Functions*. In Large Eddy Simulation of Channel using Wall Functions. (P. 6, Chapter 2). Sweden.

4.4.4 FACTORES DE FRICCIÓN EN CANALES RUGOSOS.

La condición de pared de “no deslizamiento” es debido a la viscosidad y fricción en los contornos sólidos. El estudio de canales tiene canales hidráulicamente lisos o hidráulicamente rugosos, donde en el fondo o en las paredes de un canal rugoso

ocurren flujos turbulentos, los cuales tienen diferente tipo de comportamiento hidráulico según la altura de la rugosidad k_s y del espesor de la capa laminar y^+ .

Pared Hidráulicamente lisa. - Es cuando la subcapa laminar y^+ es mayor que la altura de rugosidad k_s , $k_s < y^+$.

Pared Hidráulicamente rugosa. - Es cuando la altura de rugosidad es mayor que la capa sublamina $k_s > y^+$, en este tipo de flujo es completamente dependiente de la rugosidad e independiente del número de Reynolds.

Pared Hidráulicamente de transición. - La zona de transición debe cumplir los límites de la Ec. 4.7, cuando se tienen valores cercanos a los inferiores se comporta como pared lisa y en el caso de estar sobre los límites superiores se comporta como rugoso.

$$5 \leq \frac{v_* k_s}{\nu} \leq 70 \quad (4.7)$$

$$v_* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} = \sqrt{g R_h S} \quad (4.8)$$

Dónde:

v^* : Velocidad de fricción.

K_s : Altura de rugosidad.

S : Pendiente del canal.

ν : Viscosidad cinemática.

τ_o : Esfuerzo tangencial.

4.4.5 ECUACIONES DE GOBIERNO DE FLUJOS EN MOVIMIENTO.

En el acápite 2.4 se expusieron las ecuaciones que gobiernan un flujo en movimiento, las cuales representan la conservación de masa, conservación de momento y

conservación de la Energía, presentando como resumen las siguientes expresiones:

$$\text{Ec. de Conservación de la Masa: } \frac{\delta \rho}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho \cdot u) = 0 \quad (4. 9)$$

$$\text{Ec. de Conservación del Momento: } \frac{\delta \rho u}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho \cdot u \cdot u) = \rho \cdot g + \nabla \cdot \sigma \quad (4. 10)$$

$$\text{Ec. De Conservación de Energía: } \frac{\delta \rho e}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho \cdot e \cdot u) = \rho \cdot g \cdot u + \nabla \cdot (\sigma \cdot u) - \nabla \cdot q + \rho \cdot Q \quad (4. 11)$$

Donde:

ρ : Densidad del fluido.

u : Campo de velocidades en los 3 ejes coordenados.

σ : Tensor de tensiones.

e : Energía específica total.

Q : Volumen de energía.

q : Flujo de calor.

g : Valor de la gravedad.

4.5 DEFINICIÓN Y SELECCIÓN DEL MODELO DE TURBULENCIA PARA LA SIMULACIÓN.

El modelo de turbulencia con el cual se trabajará en la presente investigación es el Modelo de Turbulencia k – Omega SST (shear-stress transport), ya que es útil para la recreación de flujos desarrollados e inestables en CFD.

4.5.1 MODELO k-omega SST (Menter's Shear Stress Transport).

Este modelo (k- ω SST) fue desarrollado por Menter F. (1994). Es la combinación de los modelos k – épsilon (k- ϵ) para flujos a superficie libre y k-omega (k- ω) para flujos en la subcapa viscosa en flujos a superficie libre y la adicción de un término

de transporte de esfuerzo cortante (SST) (Menter, 1993). Este modelo representa los fenómenos de flujos cercanos y alejados a contornos sólidos con valores de Reynolds altos y bajos, en las Ec. (4.12) y (4.13) se indica las ecuaciones para energía cinética turbulenta y disipación de energía turbulenta.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \rho P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (4. 12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \omega) = \frac{\gamma}{\nu_t} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega \quad (4. 13)$$

A continuación se muestra las ecuaciones para las distintas variables para el modelo de turbulencia K-omega (ω).

$$D_\omega = 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (4. 14)$$

$$P = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (4. 15)$$

$$\tau_{ij} = \mu_t \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (4. 16)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4. 17)$$

$$\mu_t = \frac{\rho \alpha_1 k}{\max(\alpha_1, \omega, \Omega F_2)} \quad (4. 18)$$

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2 \quad (4. 19)$$

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (4. 20)$$

$$\arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500 \nu}{d^2 \omega} \right), \frac{4 \rho \sigma_{\omega,2} k}{CD_{k\omega} d^2} \right] \quad (4. 21)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2 \sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20} \right) \quad (4. 22)$$

$$F_2 = \tanh(\arg_2^4) \quad (4. 23)$$

$$\arg_2 = \max\left(2 \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500\nu}{d^2 \omega}\right) \quad (4. 24)$$

Donde:

Valores de constantes para k- ω .

$$\sigma_{k1} = 0.85 \quad \sigma_{\omega1} = 0.65 \quad \beta_1 = 0.075$$

Valores de constantes para k- ϵ .

$$\sigma_{k2} = 1.00 \quad \sigma_{\omega2} = 0.856 \quad \beta_2 = 0.0828$$

Valores de constantes del modelo SST.

$$\beta^* = 0.09 \quad \alpha_1 = 0.31$$

4.6 CONFIGURACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO.

Para realizar la configuración del modelo numérico de la presente investigación se tomó como referencia la configuración del caso “WaterChannel” presente en la carpeta de tutoriales de OpenFOAM para flujo multifásico de nombre interFoam, el cual es un tutorial validado y utilizado por usuarios de OpenFOAM.

Se tomó como referencia a “WaterChannel” debido a que es un caso con flujo bifásico el cual utiliza el modelo de turbulencia k- ω .

Para realizar la configuración del caso se recomienda ir revisando a la par el APÉNDICE C y el manual de usuario de OpenFOAM.

4.6.1 BOUNDARY.

El archivo Boundary define el dominio del caso en estudio, es un archivo con formato legible por OpenFOAM, resultado de la conversión a partir de otro programa, en el caso de la presente investigación desde el programa GMSH que se realizó la malla. La ubicación de este archivo depende de la versión de OpenFOAM. Para la versión 3.0.1, el archivo se encuentra dentro de las carpetas constant / polyMesh. En la Tabla No. 13 se muestran los contornos de la geometría con su tipología.

Tabla No. 13: ESQUEMA PARA CONFIGURACIÓN DEL ARCHIVO BOUNDARY.

CONTORNO	
NOMBRE	TIPO
inletWater	patch
outlet	patch
atmosphere	patch
walls	wall
bottom	wall
bottomr	wall

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

4.6.2 ARCHIVOS EN LA CARPETA “0”.

Esta carpeta contiene los archivos de condiciones iniciales del caso para el tiempo igual a cero ($t=0$), donde se representa los valores de inicio de la simulación. En cada archivo se definen parámetros dimensionales, parámetros de campo interno con sus respectivos valores.

Tabla No. 14: ESQUEMA PARA CONFIGURACIÓN DEL ARCHIVO DE FRACCIÓN VOLUMÉTRICA “alpha.water”.

alpha.water [0 0 0 0 0 0]		
CONTORNO	TIPO	VALOR
inletWater	fixedValue	1
outlet	zeroGradient	-
atmosphere	inletOutlet	0
walls	zeroGradient	-
bottom	zeroGradient	-
bottomr	zeroGradient	-

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

Tabla No. 15: ESQUEMA PARA CONFIGURACIÓN DEL ARCHIVO DE ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTO “k”.

k (m2/s2) [0 2 -2 0 0 0]			
CONTORNO	TIPO	VALOR	internalField
inletWater	fixedValue	0.05	0.0001
outlet			
atmosphere			
walls	kqRWallFunction	\$internalField	0.0001
bottom	kqRWallFunction	\$internalField	0.0001
bottomr	kqRWallFunction	\$internalField	0.0001

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

Para la Tabla No. 15, la intensidad de turbulencia es un tema aún complejo, donde sus valores fueron obtenidos mediante la experimentación. Para una buena simulación es recomendable realizar una buena estimación de la intensidad de turbulencia.

Las estimaciones recomendadas son:

- Casos de alta turbulencia: Cuando se tienen flujos con altas velocidades (Números de Reynolds altos) dentro de geometrías complejas como maquinaria rotativa (turbinas), valores de 5% - 20%.
- Casos de turbulencia media: Cuando se tienen flujos con velocidades medias - altas en estructuras no tan complejas (tuberías, canales), valores de 1% - 5%.
- Casos de turbulencia baja: Cuando se tienen flujos externos, túneles de viento (ventosidad sobre un auto, sobre un avión), menos del 1%.

Tabla No. 16: ESQUEMA PARA CONFIGURACIÓN DEL ARCHIVO DE TASA ESPECÍFICA DE DISIPACIÓN VISCOSA “omega (ω)=”.

omega (1/s) [0 0 -1 0 0 0]			
CONTORNO	TIPO	VALOR	internalField
inletWater	fixedValue	\$internalField	0.003
outlet			
atmosphere			
walls	omegaWallFunction	\$internalField	0.003
bottom	omegaWallFunction	\$internalField	0.003
bottomr	omegaWallFunction	\$internalField	0.003

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

Tabla No. 17: ESQUEMA PARA CONFIGURACIÓN DEL ARCHIVO DE VISCOSIDAD CINEMÁTICA TURBULENTO “nut”.

nut (m2/s) [0 2 -1 0 0 0]		
CONTORNO	TIPO	VALOR
inletWater		
outlet		
atmosphere		
walls	nutkWallFunction	0
bottom	nutkRoughWallFunction	1.5e-6 (mm)
bottomr	nutkRoughWallFunction	1.5e-6 (mm)

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

Para la Tabla No. 17, el valor de la rugosidad absoluta k (mm) es de 0.015 correspondiente al acrílico, superficie sobre la cual se realizó las pruebas de modelo físico para contorno hidráulicamente liso.

Tabla No. 18: ESQUEMA PARA CONFIGURACIÓN DEL ARCHIVO DE PRESIÓN MODIFICADA DE INTERFASE “p_rgh”.

p_rgh (m/s) [1 -1 -2 0 0 0 0]		
CONTORNO	TIPO	VALOR
inletWater		
outlet		
atmosphere	totalPressure	0 Pa
walls		
bottom		
bottomr		

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

Según la Tabla No. 18, la presión modificada de interfase (p_{rgh}) considera la interacción de dos fluidos distintos (diferentes densidades).

Para flujos de una sola fase, el gradiente de presión dinámica en la pared será $p_g = 0$.

Para flujos bifásicos al tener densidades distintas el gradiente de presión dinámica se representa como $\rho_\alpha \cdot g$, donde ρ_α representa la densidad de la fracción de volumen. La presión modificada de interfase se representa por la expresión: $p_{rgh} = P - \rho^* \cdot g \cdot h$, donde ρ^* es la densidad de la fase de fluido de mayor peso y h representa la posición.

Tabla No. 19: ESQUEMA PARA CONFIGURACIÓN DEL ARCHIVO DE VELOCIDAD “U”.

U (m/s) [0 1 -1 0 0 0 0]		
CONTORNO	TIPO	VALOR
inletWater	flowRateInletVelocity	Q (m ³ /s)
outlet	inletOutlet	(0 0 0)
atmosphere	pressureInletOutletVelocity	(0 0 0)
walls	fixedValue	(0 0 0)
bottom	fixedValue	(0 0 0)
bottomr	fixedValue	(0 0 0)

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

La función “flowRateInletVelocity” se utiliza para ingresar como condición inicial el caudal volumétrico (m^3/s) como se indica en la Tabla No. 19. Las condiciones: (0, 0, 0) de los otros parámetros indican que al tiempo $t=0$ tienen un valor de cero.

4.6.3 ARCHIVOS EN LA CARPETA “CONSTANT”.

Esta carpeta contiene los archivos que definen las condiciones físicas del caso como: condición de gravedad (en el eje coordenado “y”), propiedades de transporte de fluidos (viscosidad y densidad), condición para la ejecución del modelo de turbulencia a emplearse en la simulación.

También contendrá una subcarpeta de nombre polyMesh donde están los archivos de la malla convertida a formato de OpenFOAM desde otro programa computacional (acápite 4.6.1).

Tabla No. 20: ESQUEMA PARA CONFIGURACIÓN DEL ARCHIVO DE GRAVEDAD “g”.

g (m/s ²)	
DIMENSIÓN	[0 1 -2 0 0 0 0]
VALOR	(0 -9,81 0)

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

Tabla No. 21: ESQUEMA PARA CONFIGURACIÓN DEL ARCHIVO DE PROPIEDADES DE TRANSPORTE “transportProperties”, EN CONDICIONES NORMALES (T=20°C Y P=Pat).

transportProperties				
MULTIFASE: AGUA - AIRE (NEWTONIANOS)				
FLUIDO	PARÁMETRO	UNIDAD	DIMENSIÓN	VALOR
AGUA	transportModel	-	-	Newtonian
	nu	m ² /s	[0 2 -1 0 0 0 0]	1E-06
	rho	kg/m ³	[1 -3 0 0 0 0 0]	1000
AIRE	transportModel	-	-	Newtonian
	nu	m ² /s	[0 2 -1 0 0 0 0]	1,48E-05
	rho	kg/m ³	[1 -3 0 0 0 0 0]	1
FASE	sigma	kg/s ²	[1 0 -2 0 0 0 0]	0,07

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

En la Tabla No. 21, se fijaron las propiedades físicas de dos fluidos Newtonianos a una temperatura promedio de 20°C: viscosidad cinemática, densidad y tensión superficial.

Tabla No. 22: ESQUEMA PARA CONFIGURACIÓN DEL ARCHIVO DE TURBULENCIA “turbulenceProperties”.

turbulenceProperties	
TIPO	simulaciónType: RAS
RASModel	kOmegaSST
turbulence	on

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

RASModel es el método de cálculo cuando se tienen flujos turbulentos e incompresibles a través del modelo de turbulencia k-omega SST.

4.6.4 ARCHIVOS EN LA CARPETA “SYSTEM”.

La carpeta en mención contiene los archivos de control de las simulaciones, como parámetros de tiempo, esquemas de discretización y solucionador de ecuaciones entre los más importantes para cualquier caso.

Tabla No. 23: ESQUEMA PARA CONFIGURACIÓN DEL ARCHIVO DE CONTROL D TIEMPO “controlDict”.

controlDict		
PARÁMETRO	VALOR	DESCRIPCIÓN
startTime	0	Control del tiempo inicial de la simulación.
endTime	50	Control del tiempo final de la simulación, [s].
deltaT	0,01	Incremento de tiempo en la simulación, [s].
writeInterval	0,1	Incremento de tiempo para escribir resultados.
writePrecision	6	Cantidad de decimales en la escritura de resultados.
timePrecision	6	Cantidad de decimales en directorios temporales.
maxCo	1	Control del Número de Courant para asegurar la convergencia de la simulación. Para flujos multifásicos en interFoam se recomienda Co=0,5.
maxAlphaCo	1	
maxDeltaT	1	

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

Para la configuración de los archivos fvSchemes y fvSolution se recomienda revisar el manual de usuario de OpenFOAM, User Guide (2015).

4.7 CARACTERIZACIÓN DEL EQUIPO DE COMPUTACIÓN.

Para llevar a cabo el presente proyecto de investigación se utilizó un equipo de escritorio (workstation), mismo que fue útil para la calibración y simulación de los casos recreados. En la siguiente tabla se detalla las características del equipo que fue facilitado por la facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.

Tabla No. 24: CARACTERISTICAS DEL EQUIPO DE COMPUTACIÓN UTILIZADO EN LA SIMULACIÓN.

CARACTERISTICAS DEL EQUIPO	
DETALLES	EQUIPO
TIPO	ESCRITORIO (Ws)
NUCLEOS	4
TIPO PROCESADOR	Intel XEON
PROCESADOR	2.8 GHz
MEMORIA RAM	64
BITS	64

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

4.8 PLAN DE PRUEBAS.

En las siguientes tablas se detalla los diferentes caudales que se utilizaron para la validación del modelo numérico.

En la fase 1, se utilizaron los datos de caudal y calados del estudio en modelo hidráulico⁴⁴ de contorno liso. Los datos antes mencionados fueron exclusivamente para la calibración del modelo numérico en el programa computacional OpenFOAM.

⁴⁴ EPN. 2000. Departamento de Ciencia del Agua. Estudio en el Modelo Hidráulico de las Obras de Derivación y Desvío de la Quebrada el Batán, (Fase A).

En Tabla No. 25 se detalla los caudales máximos, medios y mínimos, utilizados del modelo físico de la cita No. 44.

Tabla No. 25: CAUDALES ENSAYADOS EN MODELO FÍSICO PARA LA VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO 1.

CAUDALES ENSAYADOS EN EL MODELO FÍSICO			
CAUDAL	MODELO	ENSAYO	CONTORNO
	l/s		
Q ₁	16.00	EPN (FASE "A"), 2000.	Liso
Q ₂	32.00		
Q ₃	48.00		

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

Fase 2, se realizó la simulación numérica utilizando los datos del proyecto de investigación⁴⁵.

Se utilizó el caudal de 18 l/s como se indica en la Tabla No. 26, debido a que los resultados obtenidos en el modelo físico son los que mejor se aproximan los resultados obtenidos en el modelo numérico.

Tabla No. 26: CAUDALES ENSAYADOS EN MODELO FÍSICO PARA LA VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO 2.

CAUDALES ENSAYADOS EN EL MODELO FÍSICO			
CAUDAL	MODELO	ENSAYO	CONTORNO
	l/s		
Q ₄	18.92	Haro & Jara, 2010.	Liso

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

Las características de las simulaciones se muestran en la Tabla No. 27.

⁴⁵ Haro P. & Jara M. (2010). Análisis de flujo inestable y auto aireado en canales de fuerte pendiente. Tesis Previa a la Obtención de Magister (Msc): Escuela Politécnica Nacional.

Tabla No. 27: CARACTERISTICAS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA PARA CONTORNO LISO.

CARACTERISTICAS DE LA SIMULACIÓN PARA CONTORNO LISO				
ESTUDIO:	EPN (FASE "A"), 2000.			Haro & Jara, 2010.
CAUDAL	Q = 16 l/s	Q = 32 l/s	Q = 48 l/s	Q = 18,92 l/s
TIPO DE MALLA	MIXTA	MIXTA	MIXTA	MIXTA
ELEMENTOS	HEXAEDROS Y PRISMAS	HEXAEDROS Y PRISMAS	HEXAEDROS Y PRISMAS	HEXAEDROS Y PRISMAS
HEXAEDROS / PRISMAS	156075 / 30	156075 / 30	156075 / 30	156075 / 30
NÚMERO DE ELEMENTOS	156105	156105	156105	156105
RELACIÓN DE ASPECTO (Max)	9.93	9.93	9.93	9.93
ORTOGONALIDAD	59.01	59.01	59.01	59.01
MODELO DE TURBULENCIA	k-OmegaSST	k-OmegaSST	k-OmegaSST	k-OmegaSST
CONVERGENCIA	SI	SI	SI	SI
TIEMPO DE SIMULACIÓN	50 (s)	50 (s)	50 (s)	50 (s)
TIEMPO DE CONVERGENCIA	17416 (s)	14769(s)	13684 (s)	15823 (s)

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

El tiempo asumido de 50 segundos se debe a que en un principio el tiempo recomendado por el Dr. Víctor Hugo Hidalgo fue de 6 segundo, no siendo suficiente para que se llene el cuenco disipador, por lo que no se podía chequear el Principio Continuidad. Al tener un tiempo corto no se visualizaba la formación del resalto hidráulico y no había presencia de flujo a la salida de la estructura.

4.9 COMPARACIÓN, VALIDACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

En este subcapítulo se realizará la comparación, validación e interpretación de resultados obtenidos en la simulación numérica sobre una rápida de fondo liso, haciendo énfasis en el plano inclinado (fuerte pendiente).

Se efectuará la comparación de velocidades al inicio y al pie de la rápida lisa, así como el porcentaje de energía disipada en el plano inclinado.

Este proyecto no se enfocará en la disipación de energía del cuenco disipador ni en la estructura de entrega.

4.9.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS.

Luego de obtener los resultados finales de la simulación numérica se procedió a la interpretación y validación de la información. Es necesario tener la certeza que en el caso analizado (para cada caudal) se llegue a la convergencia, esperando que luego de un tiempo determinado los valores (residuales) tengan una fluctuación inapreciable, manteniéndose aproximadamente constantes.

4.9.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL MODELO NUMÉRICO FRENTE AL MODELO FÍSICO.

El modelo físico está construido en el laboratorio del Edificio de Hidráulica de la Escuela Politécnica Nacional a una escala 1:25 respecto al prototipo. El modelo tiene operación bajo el criterio de Similitud de Froude debido a que las fuerzas que predominan son las gravitacionales. En la siguiente tabla se muestran las relaciones de escala modelo hidráulico - prototipo.

Tabla No. 28: RELACIONES DE ESCALA Y VALORES PARA MODELO HIDRÁULICO CON CRITERIO DE SIMILITUD DE FROUDE.

MAGNITUD PRINCIPAL	SIMILITUD DE FROUDE	VALOR PARA MODELO 1:25
Longitudes	$L_r = L_p/L_m$	25
Superficie	$A_r = (L_r)^2$	625
Velocidad	$V_r = L_r^{(1/2)}$	5
Tiempo	$t_r = L_r^{(1/2)}$	5
Caudal	$Q_r = L_r^{(5/2)}$	3125
Aceleración	$a_r = V_r / t_r$	1
Presión	$(\rho/\gamma)_r = L_r$	25

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FUENTE: EPN (2000). Departamento de Ciencia del Agua. Estudio en Modelo Hidráulico de las Obras de Derivación y Desvío de la Quebrada el Batán (Fase A). (pág. 6).

Una vez revisadas las relaciones entre modelo – prototipo y la convergencia de la simulación, se realiza la comparación de los resultados obtenidos en la simulación numérica frente a los obtenidos en la modelación física.

Previa a la comparación de resultados de la modelación numérica es fundamental comprobar que se cumpla el Principio de Continuidad, el caudal a la salida de la estructura deberá ser similar al caudal entrante a la misma. Por esta razón se debe comprobar que no haya errores y se deben comparar las velocidades del fluido del modelo numérico con las velocidades obtenidas en el modelo físico.

Tabla No. 29: CHEQUEO DE CONTINUIDAD EN EL MODELO NUMÉRICO 1.

CAUDALES ENSAYADOS - CONTORNO LISO							
Q1 = 16 l/s		Q2 = 32 l/s		Q3 = 48 l/s		Q4 = 18,92 l/s	
INGRESO	SALIDA	INGRESO	SALIDA	INGRESO	SALIDA	INGRESO	SALIDA
16,00	17,11	32,00	26,73	48,00	45,99	18,92	20,08
-6,92%		16,45%		4,18%		-6,11%	

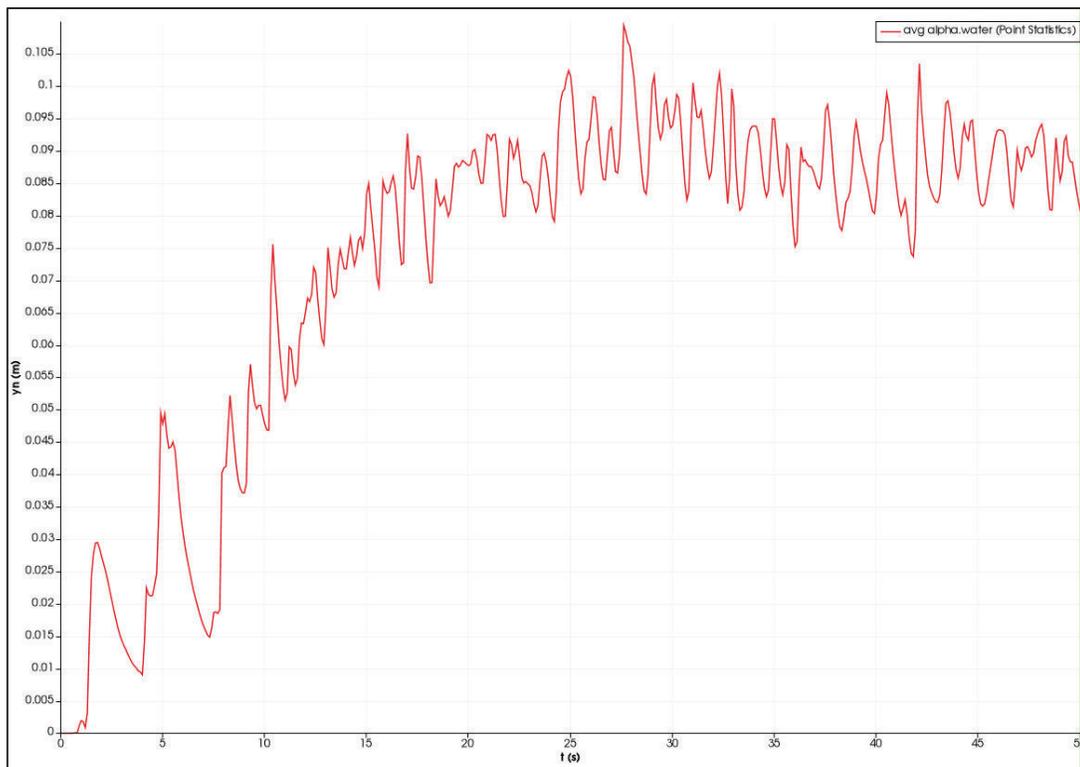
ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

Como se observa en la Tabla No. 29, el caudal que sale, difiere al caudal de ingreso, debido a que existen ondulaciones en la superficie de agua a la salida de la estructura, provocando fluctuaciones del calado.

Para poder comprobar que el principio de continuidad se cumpla en la estructura, el tiempo de simulación deberá ser analizado, puesto que al configurar un tiempo muy corto no se tendrá flujo a la salida en su totalidad, ya que debe llenarse el cuenco disipador previamente.

Las fluctuaciones del calado en la salida de la estructura se muestran en la FIGURA No. 4.10.

FIGURA No. 4. 10: FLUCTUACIONES DEL CALADO A LA SALIDA DE LA ESTRUCTURA – CONTORNO LISO.

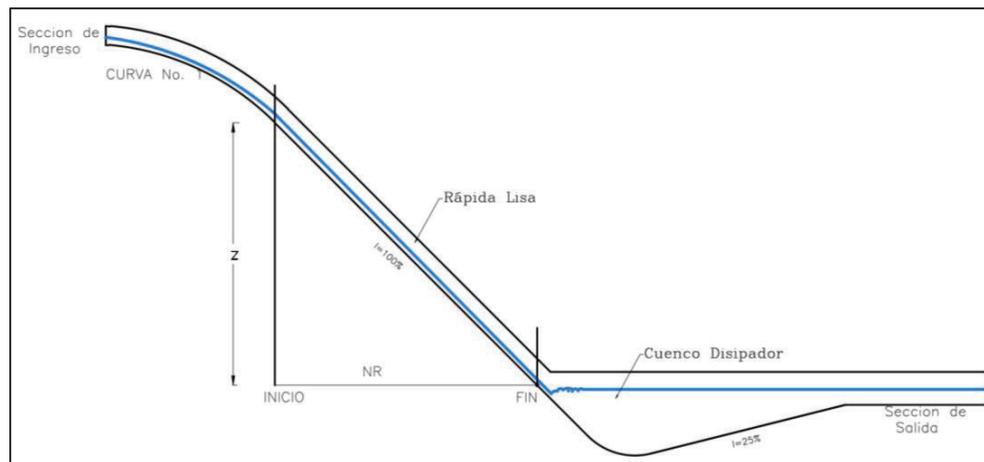


ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

En la Tabla No. 30 se indican los datos del estudio en modelo hidráulico con sus respectivas equivalencias entre modelo y prototipo. Con los datos expuestos se analizará el comportamiento del flujo en contorno liso.

Los datos corresponden al caudal y velocidad media en prototipo, mismos que mediante los factores de escala (Tabla No. 28) se obtuvieron los datos equivalentes para el modelo numérico.

En la FIGURA No. 4. 11 se muestra las secciones de la estructura en las cuales se tomó información en modelo físico.

FIGURA No. 4. 11: SECCIONES DEL CANAL DE FUERTE PENDIENTE (RÁPIDA).

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

Tabla No. 30: CAUDAL Y CALADO PARA MODELO Y PROTOTIPO EN CONTORNO LISO 1.

No. PRUEBA	DATOS CANAL HIDRAULICAMENTE LISO (EPN, 2010)						
	CAUDAL TOTAL		SECCION	CALADO MEDIO		VELOCIDAD	
	PROTOTIPO (m ³ /s)	MODELO (l/s)	RAPIDA 45°	PROTOTIPO (m)	MODELO (cm)	PROTOTIPO (m/s)	MODELO (m/s)
1	50	16	INICIO	0,20	0,80	25,64	5,13
			FIN	0,23	0,92	21,88	4,38
2	100	32	INICIO	0,46	1,84	21,62	4,32
			FIN	0,44	1,76	22,86	4,57
3	150	48	INICIO	0,65	2,60	22,99	4,60
			FIN	0,48	1,92	31,09	6,22

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

En la Tabla No. 31 se indica la información del estudio en modelo hidráulico (Haro & Jara, 2010) con sus respectivas equivalencias entre modelo y prototipo. Las lecturas de esta investigación se tomaron en modelo.

Tabla No. 31: CAUDAL Y CALADO PARA MODELO Y PROTOTIPO EN CONTORNO LISO 1.

No. PRUEBA	DATOS CANAL HIDRAULICAMENTE LISO (Haro & Jara, 2000)						
	CAUDAL TOTAL		SECCION	CALADO MEDIO		VELOCIDAD	
	PROTOTIPO (m ³ /s)	MODELO (l/s)	RAPIDA 45°	PROTOTIPO (m)	MODELO (cm)	PROTOTIPO (m/s)	MODELO (m/s)
4	59,13	18,92	INICIO	0,33	1,30	23,10	4,62
			FIN	0,25	1,00	19,90	3,98

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

Los resultados fueron obtenidos para las secciones de inicio y final del canal de fuerte pendiente. El calado y la velocidad para modelo y prototipo fueron tabulados para cada caudal en su respectiva sección, según se indica en la Tabla No. 32.

Tabla No. 32: RESULTADOS OBTENIDOS EN EL MODELO FÍSICO PARA CONTORNO LISO.

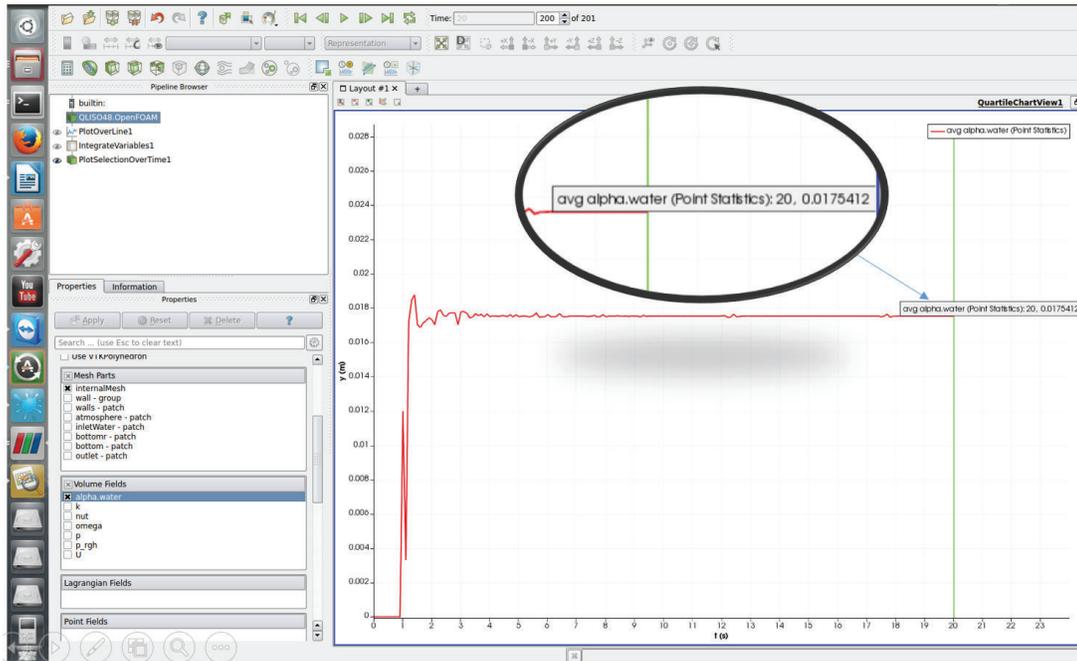
RESULTADOS MODELO FÍSICO - CONTORNO LISO				
No. PRUEBA	CAUDAL TOTAL	SECCIÓN	CALADO	VELOCIDAD
	MODELO (l/s)	RAPIDA 45°	(cm)	(m/s)
1	16	INICIO	0.80	5.13
		FIN	0.92	4.38
2	32	INICIO	1.84	4.32
		FIN	1.76	4.57
3	48	INICIO	2.60	4.60
		FIN	1.92	6.22
4	18.92	INICIO	1.30	4.62
		FIN	1.00	3.98

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

A través de la herramienta de posprocesamiento de OpenFOAM “ParaView” se obtuvieron las lecturas de los calados para realizar los cálculos de la velocidad, FIGURA No. 4. 12. El mismo procedimiento mediante continuidad se realizó para el estudio en modelo hidráulico.

Para la lectura de los calados en la sección inicial o final de la rápida se recomienda representar el gráfico de fracción volumétrica (α_{water}) vs altura del canal, luego para encontrar el calado se lo hace mediante la integración de la fracción volumétrica desde el fondo del canal hasta la atmósfera trazando una línea perpendicular en el plano de la rápida de pendiente de 100%.

FIGURA No. 4. 12: INTEGRACIÓN DE LA FRACCIÓN VOLUMÉTRICA PARA LA LECTURA DEL CALADO.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

En la Tabla No. 33 se han tabulado los resultados de calado y velocidad al inicio y final de la rápida, obtenidos en el paquete computacional OpenFOAM para cada caudal simulado.

Tabla No. 33: RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PROGRAMA OpenFOAM PARA CONTORNO LISO.

RESULTADOS OpenFOAM - CONTORNO LISO				
No. PRUEBA	CAUDAL TOTAL	SECCIÓN	CALADO	VELOCIDAD
	MODELO (l/s)	RAPIDA 45°	(cm)	(m/s)
1	16	INICIO	0.90	4.44
		FIN	0.85	4.71
2	32	INICIO	1.69	4.73
		FIN	1.28	6.25
3	48	INICIO	2.35	5.11
		FIN	1.75	6.86
4	18.92	INICIO	1.13	4.19
		FIN	0.95	4.98

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

Para realizar la comparación de resultados obtenidos en modelo físico respecto a los resultados obtenidos en modelo numérico, se recomienda trabajar con porcentajes de desviación al comparar entre los resultados de modelo físico y numérico no debe exceder valores superiores de entre 5% - 10%.

En la Tabla No. 34 se calculó el porcentaje de desviación entre los valores de calado y velocidad, donde se puede apreciar desviaciones superiores al límite recomendado para este tipo de estudios comparativos.

Las grandes desviaciones en ciertas secciones de los distintos caudales se pueden explicar debido a los siguientes factores:

- 1) Precisión de los instrumentos hidráulicos en los ensayos de modelación física.
- 2) Distribución de flujo no uniforme.
- 3) Apreciación visual en la lectura de calados ante flujos bifásicos (mezcla agua – aire) con elevados números de Reynolds en el canal de fuerte pendiente.
- 4) Presencia de flujo pulsatorio.
- 5) Falta de refinamiento de la malla del dominio de estudio para el modelo numérico.

Tabla No. 34: PORCENTAJE DE DESVIACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PROGRAMA OpenFOAM FRENTE A LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL MODELO FÍSICO.

PORCENTAJE DE DESVIACIÓN - CONTORNO LISO				
No. PRUEBA	CAUDAL TOTAL	SECCIÓN	DESVIACIÓN (%)	
	MODELO (l/s)	RAPIDA 45°	CALADO	VELOCIDAD
1	16	INICIO	12.50%	13.33%
		FIN	7.61%	7.54%
2	32	INICIO	8.15%	9.48%
		FIN	27.27%	36.70%
3	48	INICIO	9.62%	11.06%
		FIN	8.85%	10.28%
4	18.92	INICIO	13.08%	9.40%
		FIN	5.00%	25.10%

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

CAPÍTULO 5

MODELACIÓN NUMÉRICA DE UNA RÁPIDA DE CONTORNO RUGOSO UTILIZANDO EL PAQUETE COMPUTACIONAL OpenFOAM.

5.1 DESCRIPCIÓN.

En este capítulo se analizará el comportamiento del flujo cuando se ha cambiado la rugosidad en el fondo del canal. El cambio de rugosidad afectará únicamente al fondo del canal de fuerte pendiente y mientras que la rugosidad para el resto de la estructura se mantendrá similar a los casos de contorno liso.

La modificación de la rugosidad tiene la finalidad de comprobar el porcentaje de disipación de energía (en el tramo inclinado) respecto al modelo de contorno liso.

Como se afectará únicamente a la rugosidad de fondo del tramo inclinado (45°), se efectuarán las consideraciones hechas para contorno liso, las cuales son mantener:

- Geometría.
- Mallado.
- Condiciones de frontera.
- Modelo de turbulencia.

5.2 CONFIGURACIÓN DEL MODELO CON FONDO RUGOSO.

Para los ensayos realizados en modelo físico, se utilizó papel lija N°36 como alternativa para variar la rugosidad del fondo de la rápida.

En la FIGURA No. 5.1 se muestra las características para la numeración de papel lija.

FIGURA No. 5. 1: TAMAÑO DEL GRANO DE ARENA EN EL PAPEL LIJA SEGÚN SU NUMERACIÓN.

Sandpaper Grit Scales										
		1 Micron =		0.00003937007874		Inches				
Description Scales			MMR	MMX	CAMI Scale	ISO/FEPA (P-scale)	Finishing Scale	Grit	Particle Size in Microns	Particle Size in Inches
M	Very Coarse	Very Coarse				P12		4.5	1842	0.07252
						P16			1815	0.07146
A	Very Coarse	Very Coarse			16			4	1320	0.05197
						P20			1000	0.03937
C	Very Coarse	Very Coarse			20			3.5	905	0.03563
						P24			764	0.03008
R	Coarse	Coarse			24			3	715	0.02815
						P30			638	0.02512
O	Coarse	Coarse			30			2.5	642	0.02528
						P36			538	0.02118
G	Coarse	Coarse			36			2	535	0.02106
						P40			428	0.01685
					40			1.5	425	0.01673
					50			1	351	0.01382
						P50			336	0.01323

FUENTE: <http://www.seabeam.com/polish/GritScales.pdf>

Según la información técnica, la lija N° 36 utilizada en el modelo para contorno rugoso, corresponde a una lija de arena gruesa, con un tamaño de arena o grano igual a 0.02106 pulgadas, equivalente a 0.53 mm.

Conociendo la altura de rugosidad de la lija se procede a cambiar en el programa el archivo “nut” que se encuentra dentro de la carpeta “0”. Cabe aclarar que este será el único archivo que se modificará para continuar con la simulación, y si se quiere alterar los tiempos de simulación se modifica el archivo “controlDict”. Los demás archivos de los directorios “0”, “Constant” y “System” mantendrán la misma configuración que los de contorno liso.

La condición de contorno que se modificará será la llamada “bottomr”, la cual afecta solo al fondo del canal de fuerte pendiente. En la Tabla No. 35 se indica la modificación realizada.

Tabla No. 35: ESQUEMA PARA CONFIGURACIÓN DEL ARCHIVO DE VISCOSIDAD CINEMÁTICA TURBULENTA “nut”, PARA CONTORNO RUGOSO.

nut (m2/s) [0 2 -1 0 0 0]		
CONTORNO	TIPO	VALOR
inletWater		
outlet		
atmosphere		
walls	nutkWallFunction	0
bottom	nutkRoughWallFunction	1.5e-6 (mm)
bottomr	nutkRoughWallFunction	0.53e-3 (mm)

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

5.3 PLAN DE PRUEBAS.

Para el plan de pruebas los modelos fueron calibrados con los caudales utilizados para contorno liso, según se indica en las Tablas No. 25 y No. 26.

Tabla No. 36: CAUDALES ENSAYADOS EN MODELO FÍSICO PARA LA VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO 3.

CAUDALES ENSAYADOS EN EL MODELO FÍSICO				
CAUDAL	MODELO	PROTOTIPO	ENSAYO	CONTORNO
	l/s	m3/s		
Q1	16,00	50,00	EPN (FASE "A"), 2000.	Rugoso
Q2	32,00	100,00		
Q3	48,00	150,00		

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

Tabla No. 37: CAUDALES ENSAYADOS EN MODELO FÍSICO PARA LA VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO 4.

CAUDALES ENSAYADOS EN EL MODELO FÍSICO				
CAUDAL	MODELO	PROTOTIPO	ENSAYO	CONTORNO
	l/s	m3/s		
Q4	18,92	59,13	Haro & Jara, 2010.	Rugoso

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

Las características de las simulaciones en la estructura de contorno rugoso se indican en la Tabla No. 38.

Tabla No. 38: CARACTERISTICAS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA PARA CONTORNO RUGOSO.

CARACTERISTICAS DE LA SIMULACIÓN PARA CONTORNO RUGOSO				
ESTUDIO:	EPN (FASE "A"), 2000.			Haro & Jara, 2010.
CAUDAL	Q = 16 l/s	Q = 32 l/s	Q = 48 l/s	Q = 18,92 l/s
TIPO DE MALLA	MIXTA	MIXTA	MIXTA	MIXTA
ELEMENTOS	HEXAEDROS Y PRISMAS	HEXAEDROS Y PRISMAS	HEXAEDROS Y PRISMAS	HEXAEDROS Y PRISMAS
HEXAEDROS / PRISMAS	156075 / 30	156075 / 30	156075 / 30	156075 / 30
NÚMERO DE ELEMENTOS	156105	156105	156105	156105
RELACIÓN DE ASPECTO (Max)	9.93	9.93	9.93	9.93
ORTOGONALIDAD	59.01	59.01	59.01	59.01
MODELO DE TURBULENCIA	k-OmegaSST	k-OmegaSST	k-OmegaSST	k-OmegaSST
CONVERGENCIA	SI	SI	SI	SI
TIEMPO DE SIMULACIÓN	50 (s)	50 (s)	50 (s)	50 (s)
TIEMPO DE CONVERGENCIA	17572 (s)	14467(s)	13273 (s)	15924 (s)

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

5.4 COMPARACIÓN, VALIDACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

Para la estructura de contorno rugoso habrá que chequear que cumpla el Principio de Continuidad. Se realiza el mismo procedimiento que en el caso de contorno liso. Ver Tabla No. 39.

Se visualiza ondulaciones en la superficie de agua a la salida de la estructura, provocando fluctuaciones del calado. Las fluctuaciones del caudal a la salida de la estructura se muestran en la FIGURA No. 5. 2.

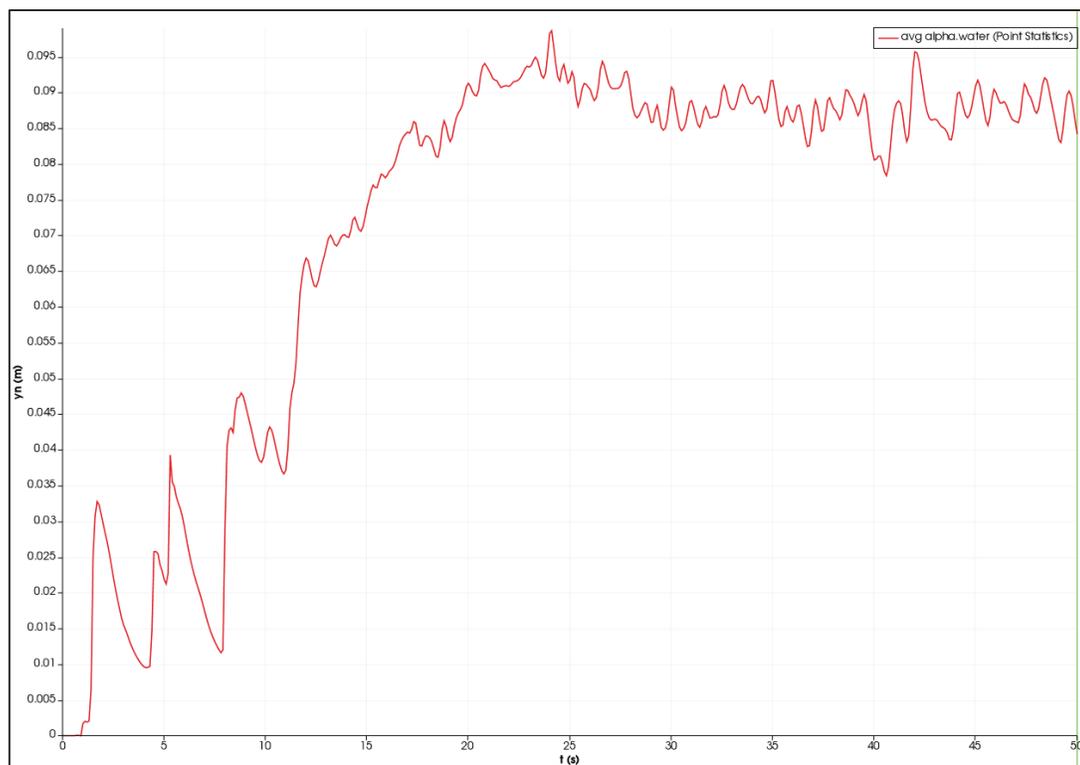
Los porcentajes obtenidos para contorno rugoso son menores a los porcentajes de contorno liso, presentándose menor fluctuación del calado en la sección de salida.

Tabla No. 39: CHEQUEO DE CONTINUIDAD EN EL MODELO NUMÉRICO 2.

CAUDALES ENSAYADOS - CONTORNO RUGOSO							
Q1 = 16 l/s		Q2 = 32 l/s		Q3 = 48 l/s		Q4 = 18,92 l/s	
INGRESO	SALIDA	INGRESO	SALIDA	INGRESO	SALIDA	INGRESO	SALIDA
16,00	15,69	32,00	30,10	48,00	50,25	18,92	19,66
1,95%		5,92%		-4,68%		-3,92%	

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FIGURA No. 5. 2: FLUCTUACIONES DEL CALADO A LA SALIDA DE LA ESTRUCTURA – CONTORNO RUGOSO.



En la Tabla No. 48 se muestran los resultados de calado y velocidad, obtenidos en el paquete computacional OpenFOAM, en las secciones de inicio y fin de la rápida con fondo rugoso.

Tabla No. 40: RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PROGRAMA OpenFOAM PARA CONTORNO RUGOSO.

RESULTADOS OpenFOAM - CONTORNO RUGOSO				
No. PRUEBA	CAUDAL TOTAL	SECCIÓN	CALADO	VELOCIDAD
	MODELO (l/s)	RAPIDA 45°	(cm)	(m/s)
1	16	INICIO	1.13	3.54
		FIN	1.02	3.92
2	32	INICIO	1.88	4.26
		FIN	1.73	4.62
3	48	INICIO	2.54	4.72
		FIN	2.23	5.38
4	18.92	INICIO	1.29	3.67
		FIN	1.16	4.08

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

Los resultados obtenidos en la Tabla No. 41, corresponde al porcentaje de incremento del calado y porcentaje de disminución de velocidades cuando se ha alterado la rugosidad del fondo del canal de fuerte pendiente, frente a los resultados obtenidos para el caso de contorno liso, presentados en la Tabla No. 33.

Los porcentajes son resultado del incremento de la rugosidad del fondo del canal, puesto que la rugosidad absoluta de la lija (0.53 mm) es muy superior a la rugosidad absoluta del acrílico (0.0015 mm).

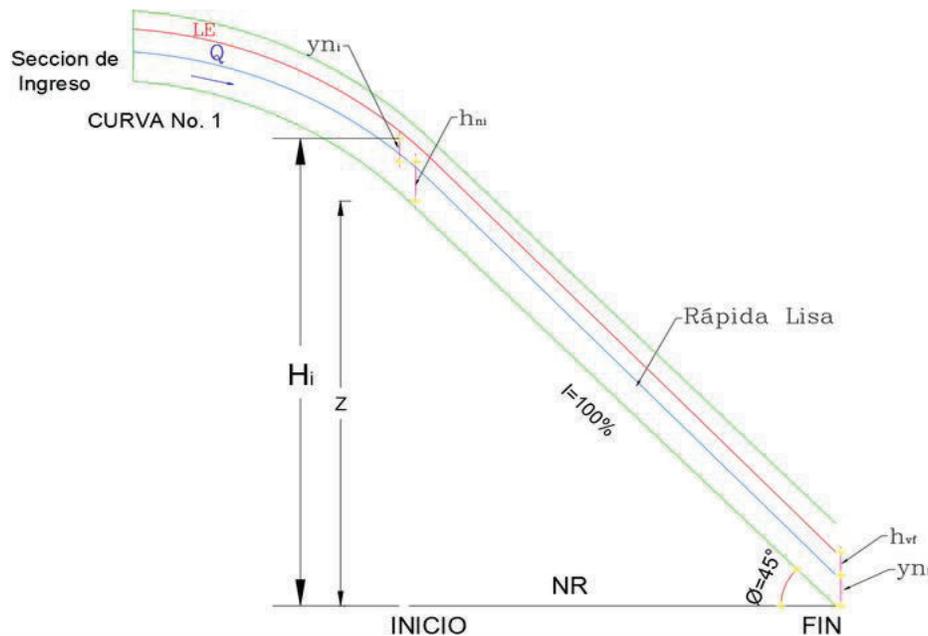
Tabla No. 41: PORCENTAJE DE DESVIACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PROGRAMA OpenFOAM PARA CONTORNO RUGOSO FRENTE A LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA CONTORNO LISO.

PORCENTAJE DE DESVIACIÓN - CONTORNO RUGOSO FRENTE A CONTORNO LISO				
No. PRUEBA	CAUDAL TOTAL MODELO (l/s)	SECCIÓN RAPIDA 45°	DESVIACIÓN (%)	
			CALADO	VELOCIDAD
1	16	INICIO	25.56%	20.35%
		FIN	20.00%	16.67%
2	32	INICIO	11.24%	10.11%
		FIN	35.16%	26.01%
3	48	INICIO	8.09%	7.48%
		FIN	27.43%	21.52%
4	18.92	INICIO	14.16%	12.40%
		FIN	22.11%	18.10%

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

Para determinar la eficiencia en la estructura se procede a determinar la energía del sistema, tomando las secciones de inicio y fin de la rápida para el análisis como se indica en la FIGURA No. 5. 3.

FIGURA No. 5. 3: ESQUEMA DE SECCIONES A CONSIDERAR PARA DETERMINAR ENERGÍAS EN EL SISTEMA.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

$$H_i = \alpha \frac{V_i^2}{2g} + y_{ni} \cos \phi + Z_i \quad H_f = \alpha \frac{V_f^2}{2g} + y_{nf} \cos \phi + Z_f \quad (5.1)$$

En la Tabla No. 42 muestra los resultados del cálculo de disipación de energía mediante las Ec. (5.1).

Tabla No. 42: VARIACIÓN DE ENERGÍA EN LA RÁPIDA PARA CONTORNO LISO.

PRUEBA	CAUDAL	VARIACIÓN DE ENERGÍA - CONTORNO LISO			
		No	MODELO (l/s)	Ei (m)	Ef (m)
1	16	3.89	1.25	0.68	67.96
2	32	4.05	2.20	0.46	45.68
3	48	4.26	2.65	0.38	37.81
4	18.92	3.77	1.40	0.63	62.96

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

En la Tabla No. 43 se procede a calcular la energía para la estructura de contorno rugoso.

Tabla No. 43: VARIACIÓN DE ENERGÍA EN LA RÁPIDA PARA CONTORNO RUGOSO.

PRUEBA No	CAUDAL MODELO (l/s)	VARIACIÓN DE ENERGÍA - CONTORNO RUGOSO			
		E _i (m)	E _f (m)	ΔE/E _i (m)	DESVIACIÓN (%)
1	16	3.49	0.87	0.75	75.09
2	32	3.81	1.21	0.68	68.20
3	48	4.05	1.64	0.60	59.52
4	18.92	3.54	0.94	0.73	73.46

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

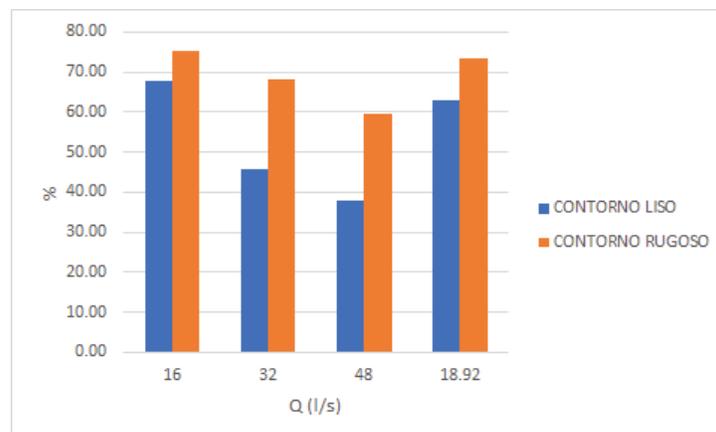
En la Tabla No. 44 y FIGURA No. 5.4 se puede observar el porcentaje de disipación de energía del modelo de contorno rugoso frente al liso.

Tabla No. 44: DESVIACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN CONTORNO LISO FRENTE A LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN CONTORNO RUGOSO.

PORCENTAJE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA			
PRUEBA No	CAUDAL MODELO (l/s)	%	
		LISO	RUGOSO
1	16	67.96	75.09
2	18.92	62.96	73.46
3	32	45.68	68.20
4	48	37.81	59.52

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

En la FIGURA No. 5. 4 se compara mediante el grafico de barras el aumento de disipación de energía para el contorno liso y contorno rugoso es ligeramente superior.

FIGURA No. 5. 4: DIAGRAMAS DE DESVIACIÓN EN DISIPACIÓN DE ENERGÍA PARA LOS CAUDALES ENSAYADOS EN CONTORNO LISO Y CONTORNO RUGOSO.

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

En las FIGURAS, No. 5.5 a No. 5.14, se realiza la comparación de los resultados obtenidos en las simulaciones para estructuras hidráulicamente lisa frente a la hidráulicamente rugosa, tomando como referencia el caudal de 48 l/s en modelo, equivalente a 150 m³/s en prototipo.

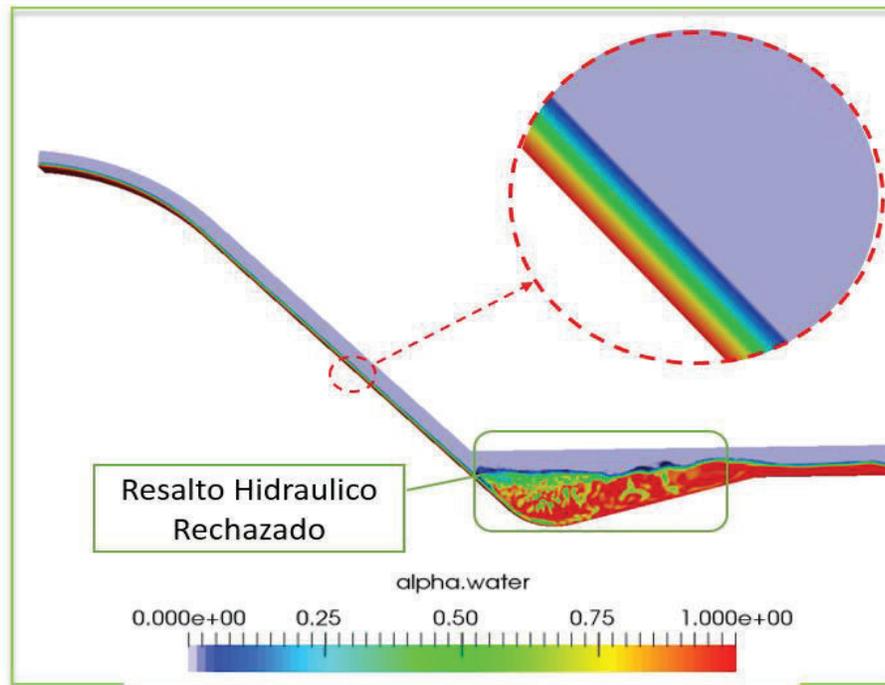
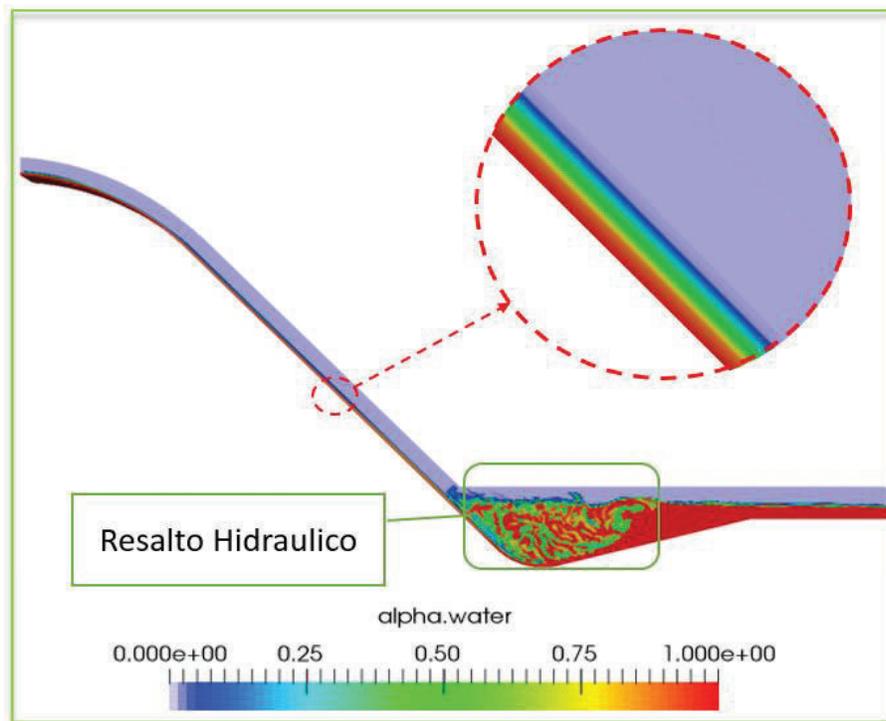
En la FIGURA No. 5.5 se presenta el esquema de fracción volumétrica (α .water) en la estructura, donde el color rojo representa el volumen de agua mientras que el resto de colores son la representación del flujo bifásico (mezcla agua - aire).

Para las secciones de inicio (FIGURA No. 5. 6) y fin (FIGURA No. 5. 7) en la rápida se representa el comportamiento de la fracción volumétrica (α .water) frente a la altura de las paredes del canal.

En las FIGURAS No. 5. 8 y 5. 9 se representan los calados en las dos secciones de estudio de la rápida, notando que los calados al inicio y al final de la rápida para contorno rugoso, son ligeramente mayores a los calados de la superficie lisa, debido a la resistencia del flujo por el incremento de la rugosidad.

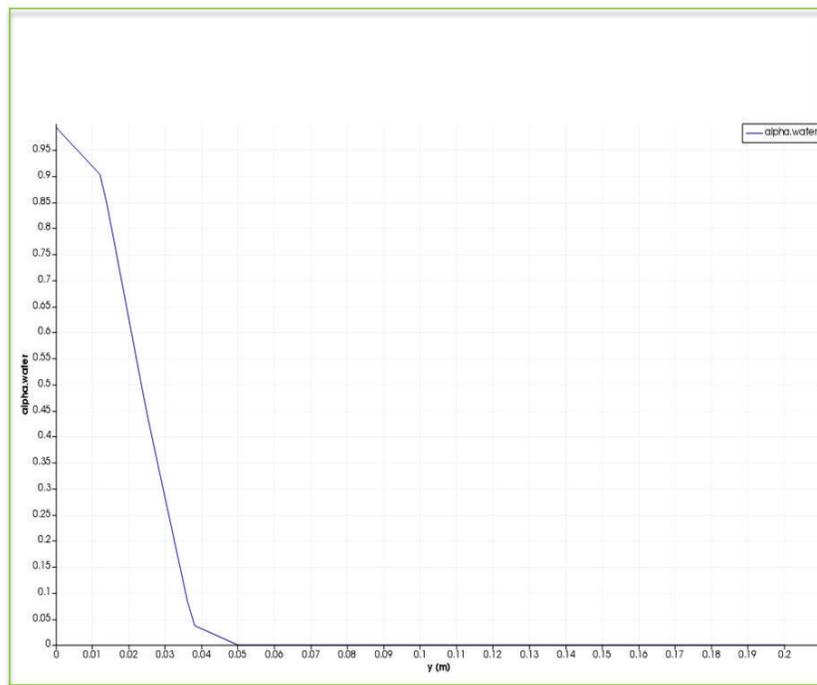
El incremento de rugosidad resulta favorable para la disipación de energía, puesto que las velocidades a lo largo del canal de fondo rugoso son menores en comparación a las velocidades obtenidas en la modelación del canal de fondo liso. En las FIGURAS No. 5. 10 a 5. 13, se realizó la comparación de velocidades para los dos contornos.

En la FIGURA No. 5. 14, se puede observar la distribución de los vectores velocidad, donde la dirección d los vectores representan el comportamiento del flujo en la estructura.

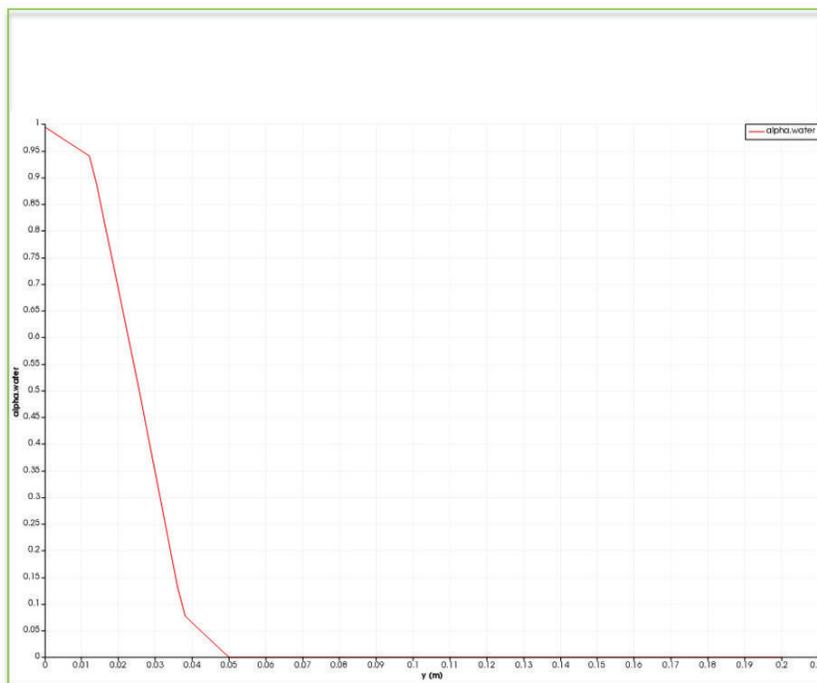
FIGURA No. 5. 5: FRACCIÓN VOLUMÉTRICA (ALPHA.WATER).**CONTORNO LISO****CONTORNO RUGOSO**

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FIGURA No. 5. 6: FRACCIÓN VOLUMÉTRICA Vs. ALTURA DE LAS PAREDES - INICIO DEL CANAL DE FUERTE PENDIENTE.



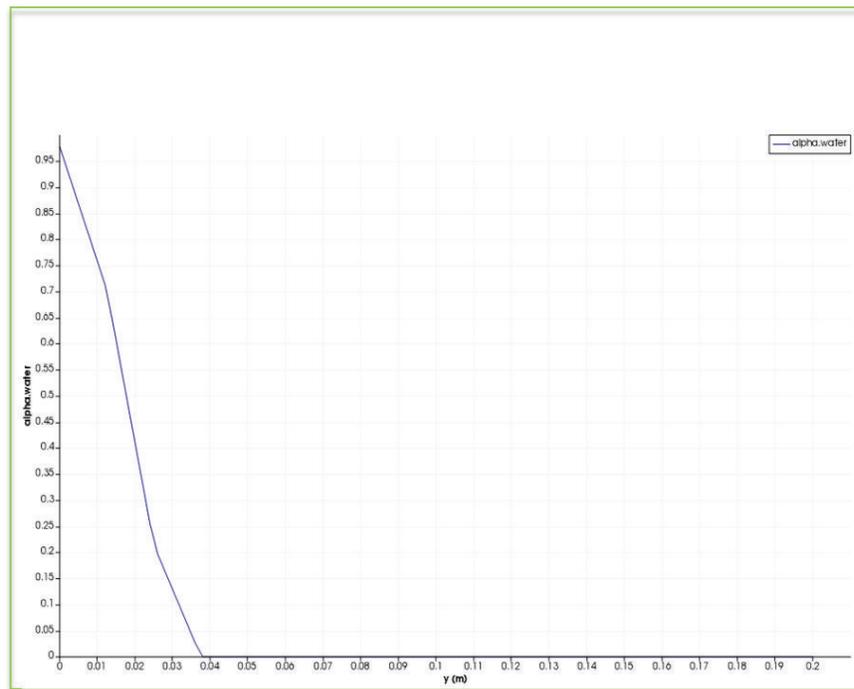
CONTORNO LISO



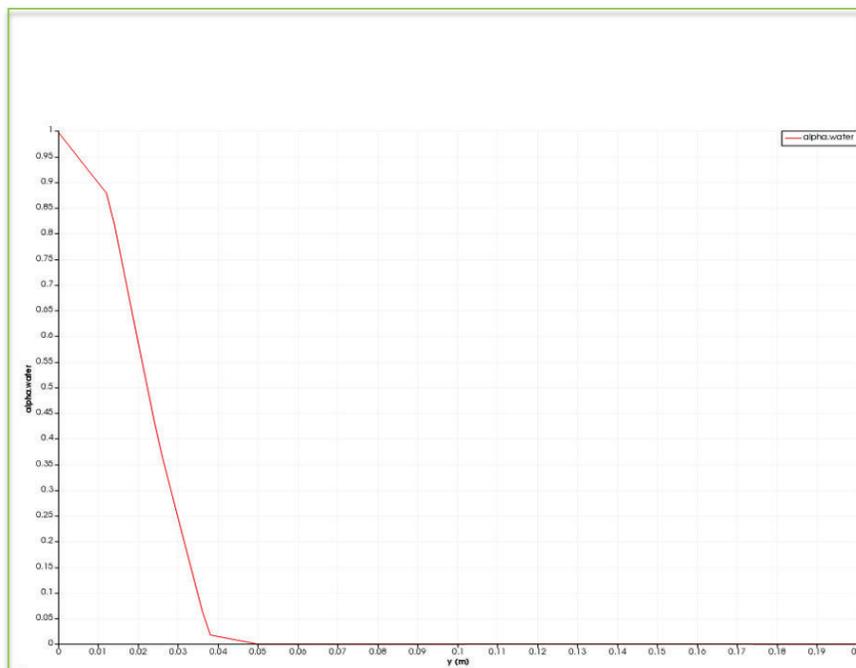
CONTORNO RUGOSO

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FIGURA No. 5. 7: FRACCIÓN VOLUMÉTRICA Vs. ALTURA DE LAS PAREDES - FINAL DEL CANAL DE FUERTE PENDIENTE.



CONTORNO LISO



CONTORNO RUGOSO

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

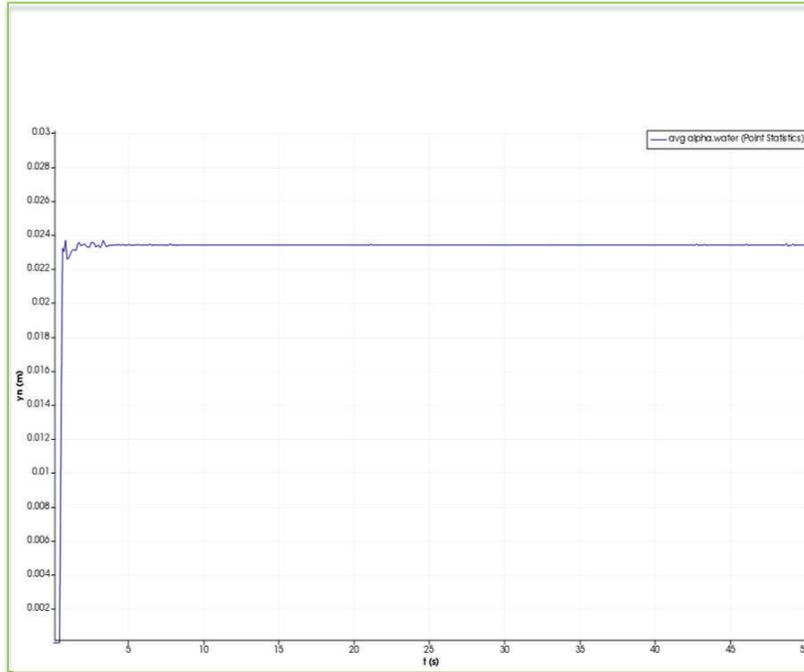
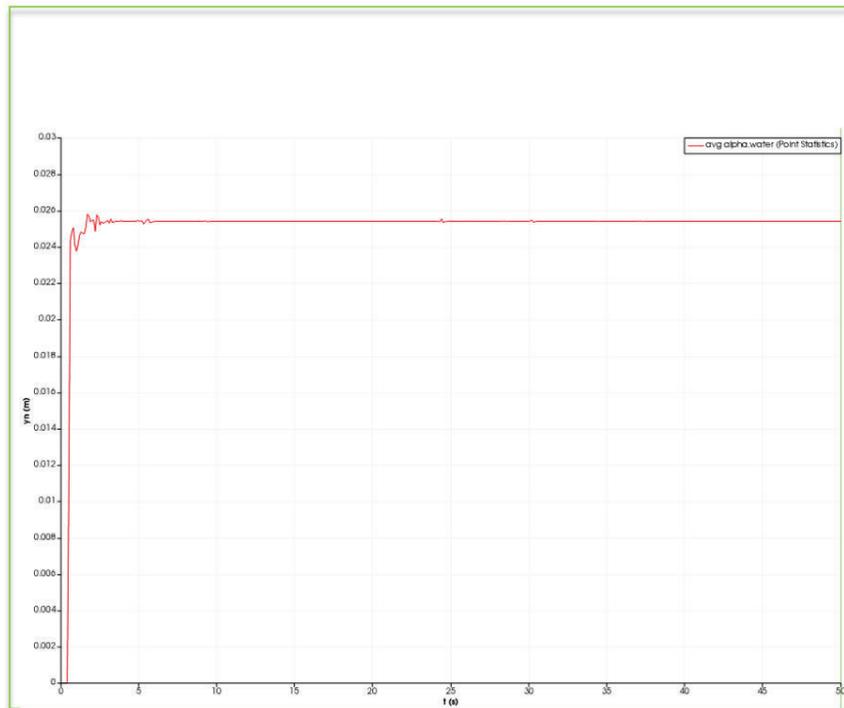
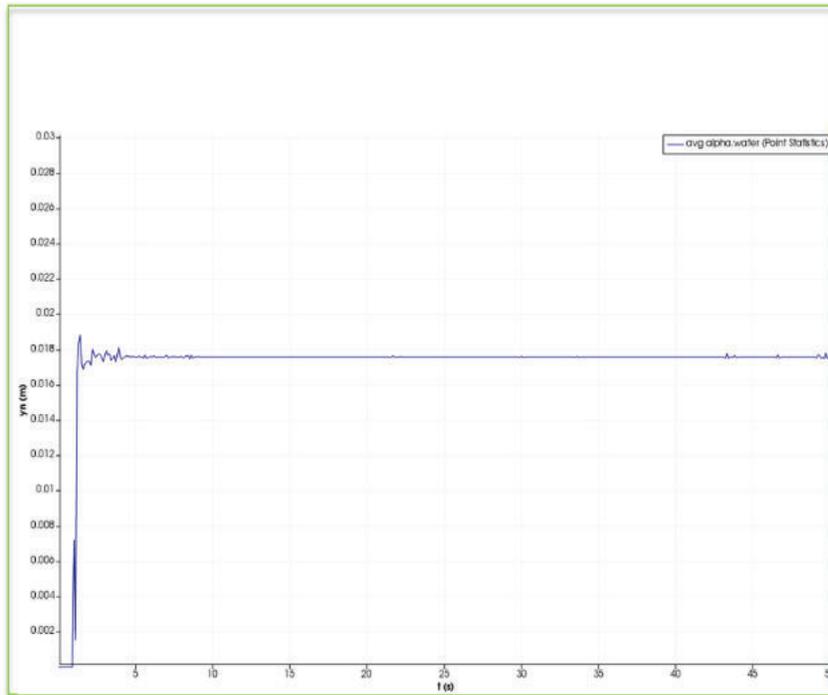
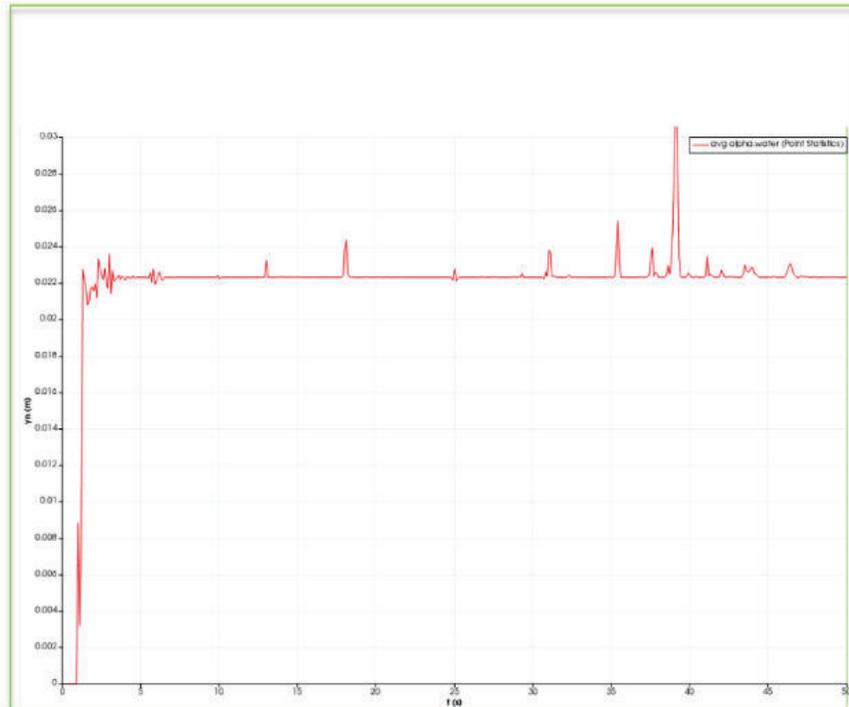
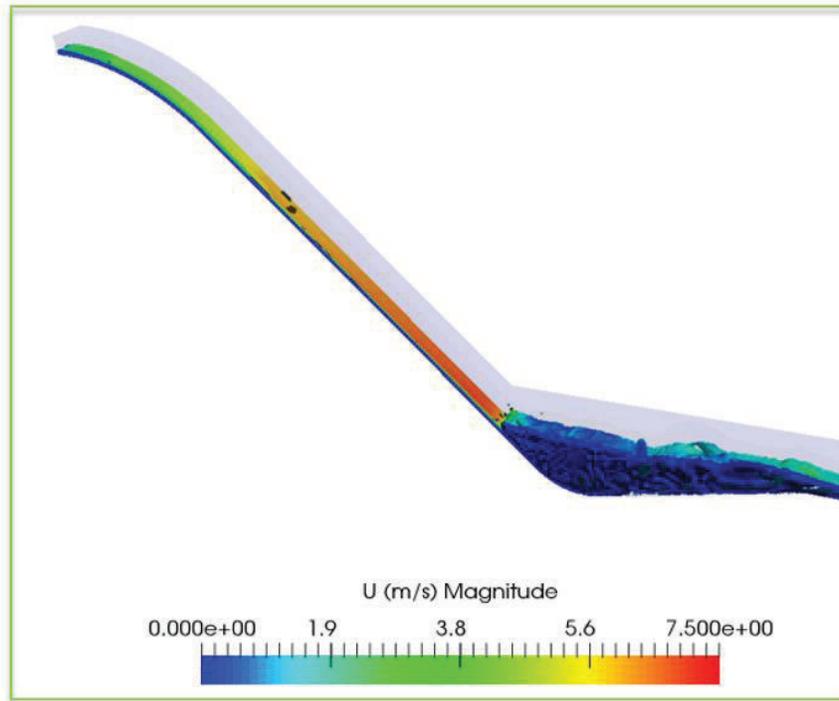
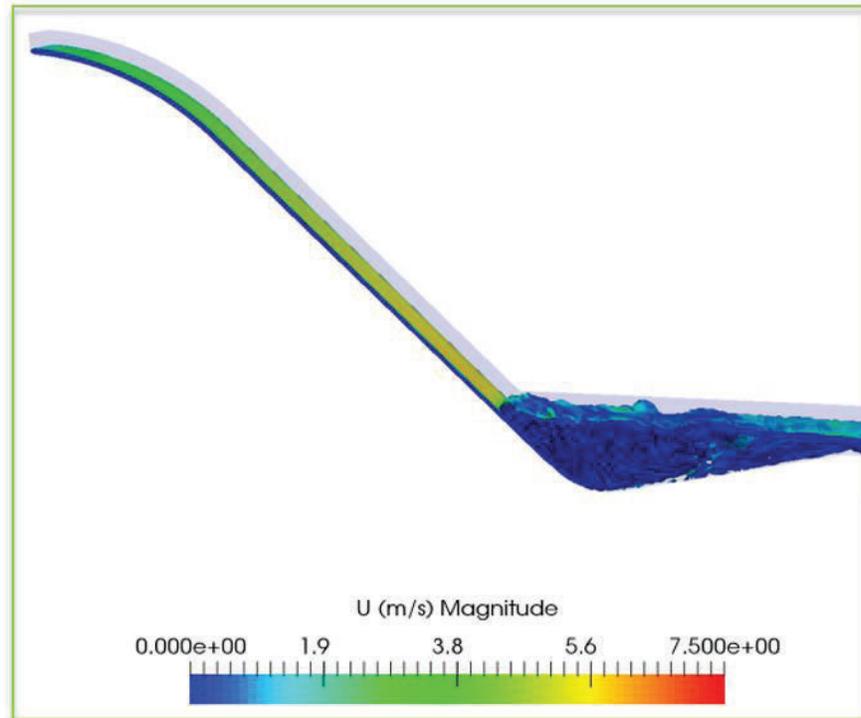
FIGURA No. 5. 8: CALADO EN LA SECCIÓN INICIAL DE LA RÁPIDA.**CONTORNO LISO****CONTORNO RUGOSO****ELABORADO POR:** José Berrones y Oscar Quilligana.

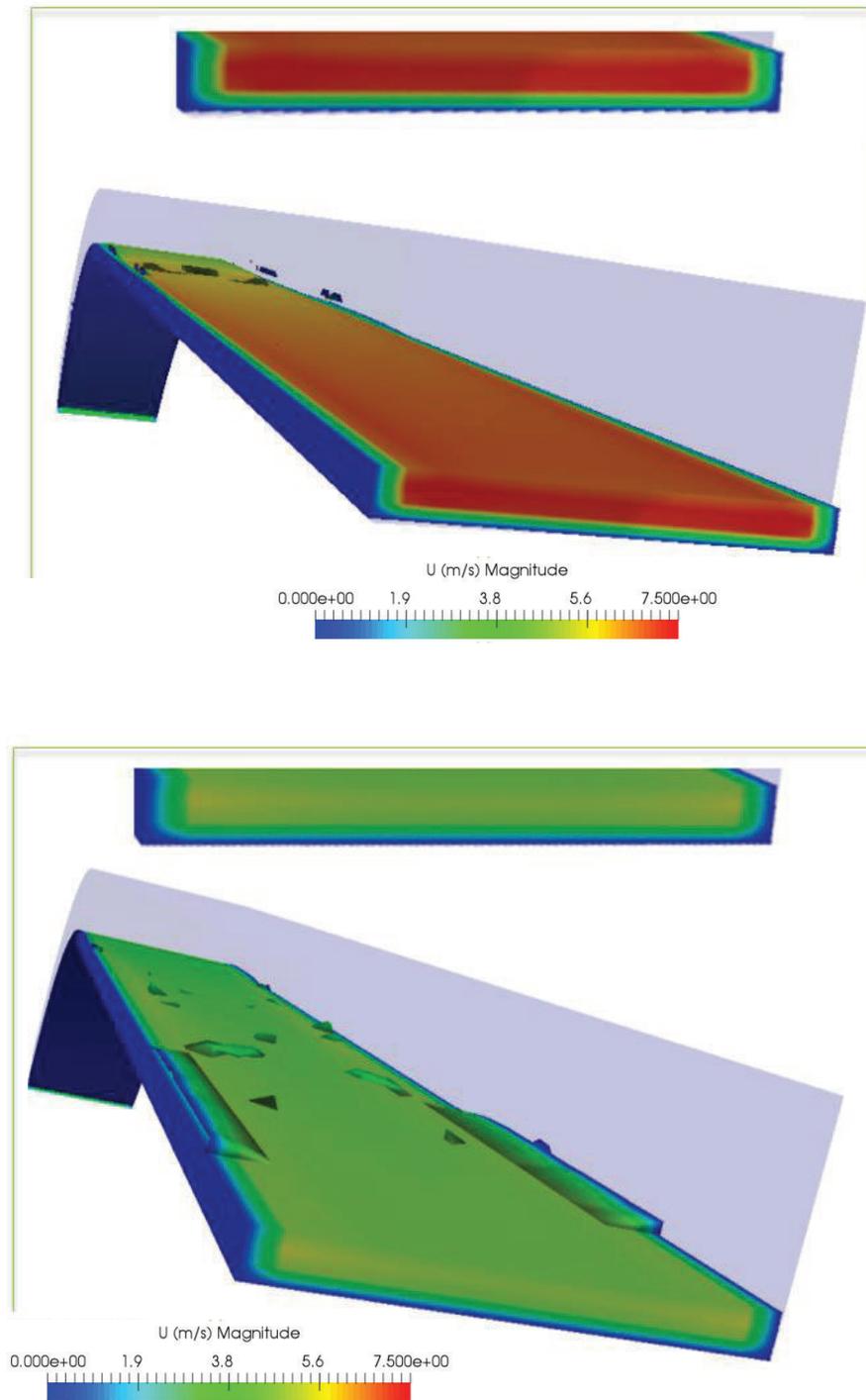
FIGURA No. 5. 9: CALADO EN LA SECCIÓN FINAL DE LA RÁPIDA.**CONTORNO LISO****CONTORNO RUGOSO**

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FIGURA No. 5. 10: VELOCIDADES A LO LARGO DE LA RÁPIDA.**CONTORNO LISO****CONTORNO RUGOSO**

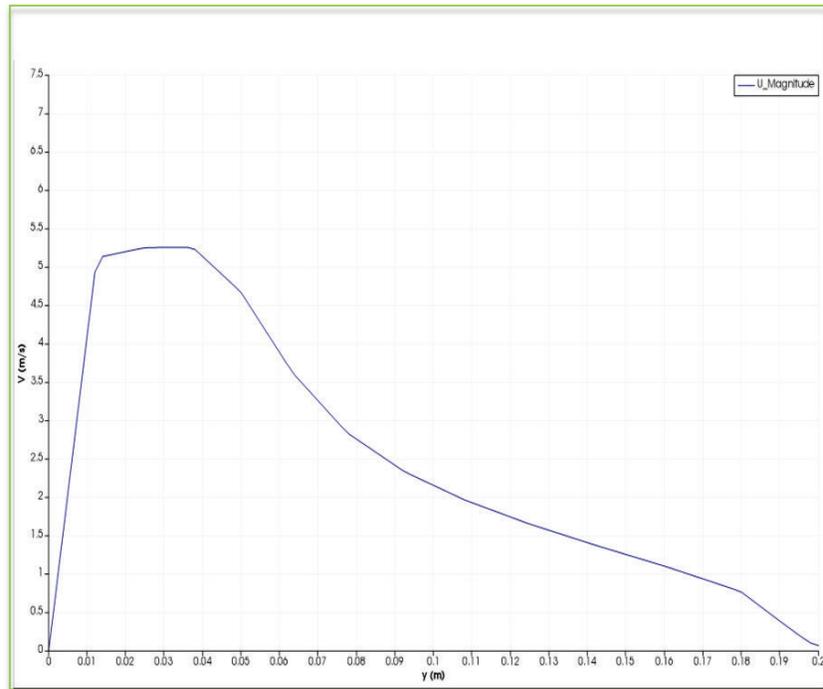
ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FIGURA No. 5. 11: VELOCIDADES REALIZANDO UN CORTE EN LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA RÁPIDA.

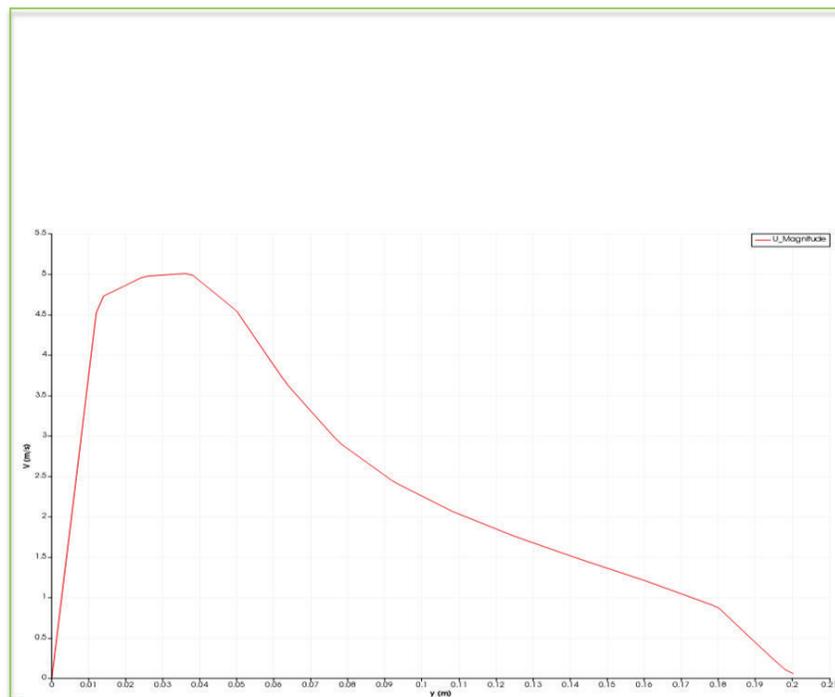


ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FIGURA No. 5. 12: PERFIL DE VELOCIDADES EN EL CANAL - INICIO DE LA RÁPIDA.

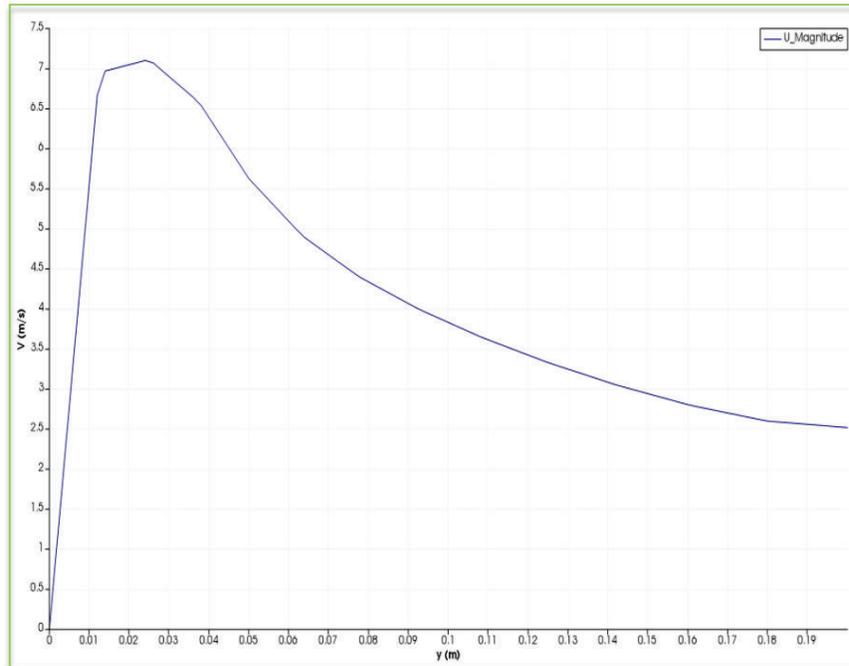
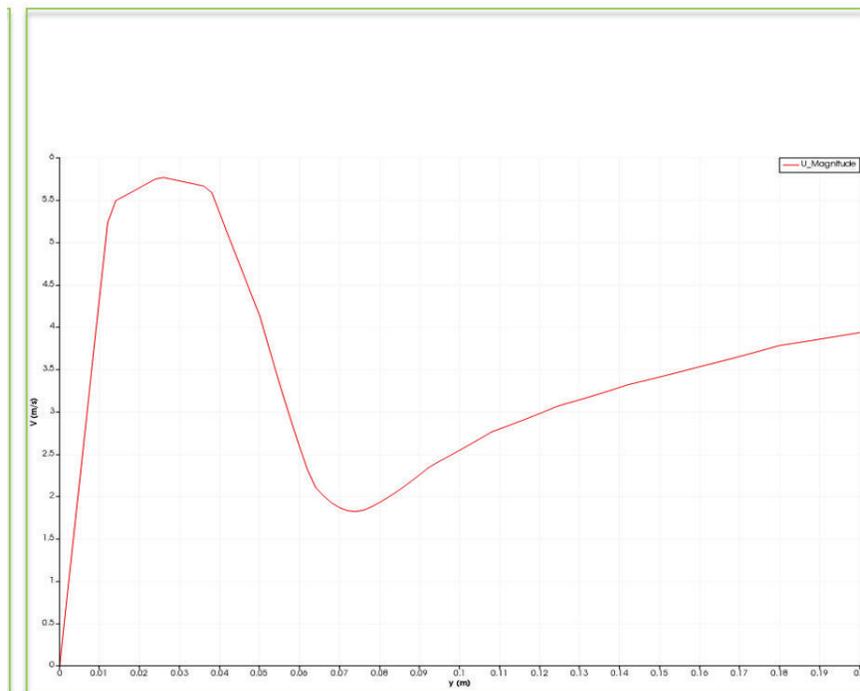


CONTORNO LISO

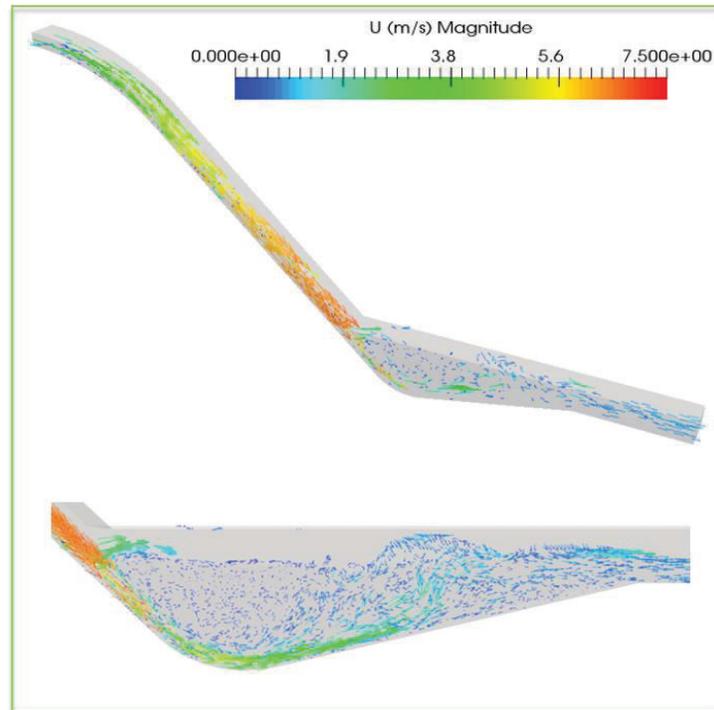
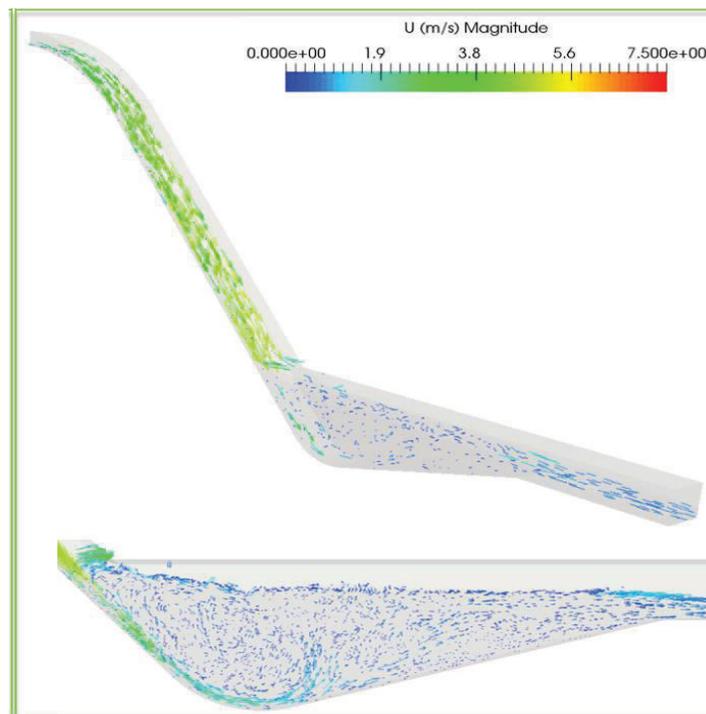


CONTORNO RUGOSO

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FIGURA No. 5. 13: PERFIL DE VELOCIDADES EN EL CANAL - FINAL DE LA RÁPIDA.**CONTORNO LISO****CONTORNO RUGOSO**

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FIGURA No. 5. 14: VECTORES VELOCIDAD.**CONTORNO LISO****CONTORNO RUGOSO**

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES DEL PROYECTO DE TITULACIÓN.

- Se logró realizar la simulación numérica mediante la validación de resultados con el “*ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO DE LA OBRA DE DERIVACIÓN Y DESVIÓ DE LA QUEBRADA EL BATÁN (FASE A)*”, debido que al inicio no se pudo validar con el proyecto de titulación propuesto en el presente trabajo. Se tuvo inconsistencias en los resultados obtenidos y por la falta de datos al ingreso del canal.
- OpenFOAM tiene como principal ventaja que al ser un software libre, el usuario tiene total acceso al código de programación, al que se lo puede ir modificando o mejorando de acuerdo a las necesidades y complejidad de cada caso.
- Para obtener información que asemeje una realidad de los fenómenos que se presentan en el modelo físico comparado al prototipo, se presentaron dificultades ante la falta de instrumentación de mayor precisión. Es una gran limitación dado que no se puede realizar una adecuada interpretación de resultados al utilizar equipos de baja precisión como Tubos de Prandtl en flujos con elevados números de Reynolds.
- Para alterar la rugosidad del fondo del canal se utilizó lija de arena gruesa N°36, con un valor $k_s=0.53$ mm según la especificación técnica indicada en la FIGURA No. 5.1. Los resultados obtenidos en la simulación numérica no fueron comparados con los resultados obtenidos en el modelo físico, ya que el valor de rugosidad utilizado fue un $k_s=0.003$ mm para el mismo material.

- Para la toma de datos del modelo físico se utilizó Tubos de Prandtl, considerados una instrumentación hidráulica de baja precisión para flujos desarrollados y con altos números de Reynolds. Estos tienen un margen de error del 1 - 5%, y ese margen aumenta cuando se tienen calados muy pequeños como en el caso de las lecturas obtenidas en el estudio “Análisis de flujo inestable y autoaireado en canales de fuerte pendiente”.
- Para el caso del “Estudio en modelo hidráulico de las obras de derivación y desvío de la quebrada El Batán” para la lectura de calados se utilizó limnómetros de punta, los cuales tienen un margen de error de entre $\pm 2.00\text{mm}$ en flujos uniformes. Si se tienen flujos autoaireados, como los que se presentan en el canal de fuerte pendiente la incertidumbre aumenta, ya que el calado a medir debería ser el calado con el 90% de concentración de aire, el cual es difícil apreciarlo a simple vista.
- Para trabajar con modelos a escala es importante verificar que se cumpla la Similitud de Froude, controlando que el Número de Reynolds sea menor en el modelo que en prototipo. Esto se logra adoptando el valor de rugosidad correcta para el modelo a escala.
- Se observa en los resultados de la simulación que para el caudal máximo de 48 l/s existe alta turbulencia en el cuenco disipador y en la sección de salida. Para contorno liso se tiene presencia de resalto hidráulico rechazado con flujo ondulatorio en la sección de salida mientras que en el contorno rugoso una presencia de resalto hidráulico sumergido.
- Con el incrementó de la altura de la rugosidad absoluta (k_s), se obtuvieron resultados favorables para la disminución de velocidades del flujo en la rápida, como se observa en la comparación de resultados para el caudal de 48 l/s, FIGURA No. 5.5.
- Se pudo incrementar en un promedio del 15 % la disipación de energía para los caudales de la simulación numérica al aumentar el valor de la rugosidad

del fondo del canal. No se pudo validar con la disipación de energía de la modelación física por no tener resultados para los caudales similares.

6.2 CONCLUSIONES DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.

- OpenFOAM es una herramienta útil y potente para metodología CFD puesto que permite la creación y modificación de solvers. Tiene un alto nivel de confiabilidad según las opiniones de los usuarios que han trabajado con software libre y software comercial.
- El solver seleccionado para las simulaciones numéricas de la presente investigación fue “interFoam”, el cual trabaja con el método de cálculo de las ecuaciones de flujo turbulento “RANS” (Reynolds Averaged Navier – Stokes) donde las ecuaciones de Navier – Stokes se resuelven basándose en un método estadístico denominado promedio de Reynolds. Este método necesariamente requiere herramientas computacionales para su resolución.
- Las ecuaciones parciales de segundo orden o ecuaciones de Navier – Stokes son útiles en la simulación numérica si se está trabajando con fluidos Newtonianos, esto quiere decir que su viscosidad deberá permanecer constante en todo el flujo. Como condición también se considera que los fluidos deben ser incompresibles.
- Se utilizó el modelo de turbulencia que dispone el programa OpenFOAM “k-Omega SST” el cual representa turbulencia en flujos con altos y bajos números de Reynolds. Debido a esto es recomendable utilizar en el análisis de capa límite y en flujos alejados de contornos sólidos como superficie libre. Este modelo es el resultado de la combinación de los modelos de turbulencia k- ϵ y k-Omega.
- Los criterios de calidad de malla están en los rangos aceptables, debido que una simulación numérica sea exitosa depende en un 70% aproximadamente que la malla sea de buena calidad para obtener la convergencia del modelo y que los resultados puedan ser validados.

6.3 RECOMENDACIONES.

- Si la simulación del caso no converge se recomienda revisar la calidad de la malla y el número de Courant, mismo que está en función del tiempo de ejecución.
- Si se desea validar y comparar resultados obtenidos en modelo numérico frente a los resultados obtenidos en modelo físico, es recomendable realizar la simulación numérica conjuntamente con los ensayos en el modelo físico, ya que en el caso de encontrar errores o inconsistencias se los puede ir corrigiendo sobre la marcha de la investigación.
- Para la calibración del modelo numérico se deben obtener la mayor cantidad de datos posibles de la modelación física.
- Para una correcta simulación numérica se debe seleccionar la rugosidad del modelo, donde el coeficiente de pérdida permanezca similar en el modelo como en el prototipo.
- Para llevar a cabo la simulación de un problema mediante metodología CFD en el programa computacional OpenFOAM, es conveniente conocer y comprender la estructura del caso, es decir, tener los archivos de los distintos parámetros en sus respectivas subcarpetas: "0", "System" y "Constant". En el caso de no tener en orden según la versión del programa no se podrá ejecutar la simulación.
- Se deben verificar las condiciones de contorno, ya que de estas depende obtener una correcta simulación del caso. Es necesario definir las antes de comenzar la simulación, teniendo seguridad de que los datos ingresados en la configuración sean correctos, debido a que el ingreso de información errónea afectaría los resultados finales.

- Se debe utilizar una geometría bien definida y una malla de buena calidad; debido que el resultado de la simulación dependerá en un alto porcentaje de la calidad de malla. Al tener una malla de mala calidad se puede tener soluciones con resultados erróneos, tiempos extremadamente largos de simulación y que no exista convergencia.
- De ser necesario el refinamiento de la malla, se lo deberá realizar lo más uniformemente posible, manteniendo suavidad en tramos curvos y en empates de superficies para que no se produzcan errores y altere a la convergencia del caso.
- Al tener una malla con un buen nivel de refinamiento, se podría apreciar de mejor manera el flujo ondulatorio y pulsatorio que se presenta sobre la rápida.
- Se deberá verificar que en la fase de calibración al momento de chequear el cumplimiento del principio de continuidad en el modelo, se haya configurado un tiempo que garantice que el caudal en el ingreso será similar al caudal a la salida, puesto que al configurar un tiempo corto el flujo aún no saldrá en su totalidad, ya que debe llenarse el cuenco disipador previamente.
- Se debe verificar que en la fase de calibración el tiempo de simulación sea el adecuado para el desarrollo de los fenómenos hidráulicos en el dominio de estudio. El tiempo configurado permitirá comprobar que el caudal de ingreso sea similar al caudal de salida (Principio de Continuidad), puesto que al configurar un tiempo corto el caudal aún no saldrá en su totalidad, ya que debe llenarse el cuenco disipador previamente.

BIBLIOGRAFÍA:

- [1] Carrillo J. (2012). Trabajo fin de período formativo, Programa de Doctorado Medio Ambiente y Minería Sostenible, Grupo de Investigación en Ingeniería Hidráulica Marítima y Medioambiental, Hidr@m, Universidad Politécnica de Cartagena.
- [2] Ortega P. (2015). Simulación numérica de una estructura separadora de caudales con metodología CFD, aplicando el paquete computacional ANSYS CFX 15.0, Tesis de E.P.N. Directora Ing. M.SC. Ximena Hidalgo, Quito, Ecuador.
- [3] Villamizar A. (2014). Aplicación de un modelo turbulento bidimensional para la simulación de flujo a superficie libre en un canal horizontal, Tesis Universidad Nacional de Colombia. Director Pedro M. Avellaneda, Ph.D. Bogotá, Colombia.
- [4] Ruiz y Narváez. (2015). Implementación del programa FLOW 3D para la simulación tridimensional del flujo en una estructura de separación de caudales, Tesis de E.P.N. Directora Ing. M.SC. Ximena Hidalgo, Quito, Ecuador.
- [5] Castro, Hidalgo y Poveda. (N/R). Sobre la Modelación Hidráulica en Obras de Saneamiento, Departamento de ciencias del Agua Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- [6] Haro y Jara. (2010). Análisis de Flujo Inestable y Autoaireado en Canales de Fuerte Pendiente, Tesis de E.P.N. Director Dr. Marco Castro Delgado, Quito, Ecuador.
- [7] Cengel, Y., & Cimbala, J. (2006). Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones. México, D.F.: McGraw Hill.
- [8] Shames, I. (1995). Mecánica de Fluidos. Colombia.: Mc Graw Hill.
- [9] Daily, J. (1975). Dinámica de los Fluidos con aplicaciones en la Ingeniería. México.: Trillas.
- [10] White, F. (2004). Mecánica de Fluidos. España.: McGraw Hill.
- [11] Ven Te Chow. (1994). Hidráulica de Canales Abiertos. Colombia.: McGraw Hill.

- [12] Furlan P. (2013). Simulación numérica de flujo en confluencia, Tesis de Universidad Nacional de Córdoba. Directora Pozzi Cecilia, Córdoba - Argentina.
- [13] Baquero J. (2015). Implicit Large Eddy Simulation for unsteady cavitating flow around hydrofoils using OpenFOAM software, Tesis de E.P.N. Director Ph.D. Esteban Valencia, Quito, Ecuador.
- [14] Guevara A. (2015). Diseño de un equipo de recuperación de líquidos de gas natural empleando CFD, Tesis de Universidad Nacional de Colombia. Director Ph.D. Luis Benalcazar, Bogotá D.C., Colombia.
- [15] Jasak H. (1996). Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Applications to Fluids Flow.
- [16] Fernández, J. (2012). Técnicas Numéricas en Ingeniería de Fluidos. Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos. Barcelona.: Reverté.
- [17] Jasak H. (1996). Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Applications to Fluids Flows, Thesis submitted for the Degree of Doctor of the University of London. London - England.
- [18] Plúa F. (2001). Análisis del problema de disipación de energía al pie de una rápida, Tesis de E.P.N. Directora Ing. M.SC. Ximena Hidalgo, Quito, Ecuador.
- [19] EPN. 2000. Departamento de Ciencia del Agua. Estudio en el Modelo Hidráulico de las Obras de Derivación y Desvío de la Quebrada el Batán, (Fase A).

ANEXOS

- **APÉNDICE A: INSTALACIÓN DEL PAQUETE COMPUTACIONAL OpenFOAM®.**
- **APÉNDICE B: PARÁMETRO PARA EL DESARROLLO DE UNA MALLA ESTRUCTURADA EN EL PROGRAMA GMSH.**
- **APÉNDICE C: INSTRUCTIVO PARA REALIZAR LA SIMULACIÓN DE UN CASO EN OpenFOAM.**

ANEXOS DIGITAL

- **APÉNDICE D: GRAFICO DE RESULTADOS DE LOS CAUDALES 32 l/s, 18.92 l/s, 16 l/s.**
- **APÉNDICE E: CÁLCULO DEL CALADO AL INGRESO DE LA ESTRUCTURA UTILIZANDO EL PROGRAMA FLOW MASTER.**
- **APÉNDICE F: PLANOS DE LA ESTRUCTURA.**

APÉNDICE A

INSTALACIÓN DEL PAQUETE COMPUTACIONAL OpenFOAM®

Para esta modalidad de instalación es necesario tener acceso a internet en el ordenador que se realizará la instalación y seguir los siguientes pasos:

1. Descargar el paquete computacional de la página web.

FIGURA No. A. 1: DESCARGA DEL PAQUETE COMPUTACIONAL OpenFOAM 3.0.1.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FUENTE: Página web: <http://openfoam.org>

2. A continuación, se presentarán las instrucciones de instalación del programa. Los Gráficos servirán para ilustrar el proceso mencionado:

FIGURA No. A. 2: PROCEDIMIENTO MEDIANTE COMANDOS PARA INSTALACIÓN DEL PAQUETE COMPUTACIONAL OpenFOAM 3.0.1.

Upgrade from OpenFOAM 3.0.0

OpenFOAM 3.0.1 is a patch release of OpenFOAM 3.0.0, which can be upgraded for the Ubuntu pack `openfoam30`. Users with an existing installation of OpenFOAM 3.0.0 on their Ubuntu system can upgrade OpenFOAM only by typing in a terminal window:

```
sudo apt-get update
sudo apt-get install --only-upgrade openfoam30
```

OpenFOAM will be upgraded from 3.0.0 to 3.0.1 also if the user does a complete upgrade of all software packages:

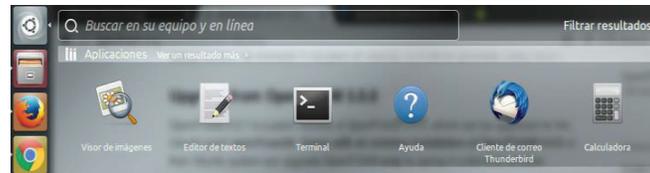
```
sudo apt-get update
sudo apt-get install upgrade
```

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FUENTE: Página web: <http://openfoam.org/download/3-0-1-ubuntu/>

3. Dentro del sistema operativo Linux, se ingresa a la barra de aplicaciones, se pulsa el Botón Buscador de Aplicaciones y luego se escoge “Terminal” para el ingreso de los comandos de instalación.

FIGURA No. A. 3: ACCESO A LA APLICACIÓN “TERMINAL” PARA INGRESO DE COMANDOS.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

4. Para el caso que se realice una nueva instalación, se deben ingresar secuencialmente los comandos que se encuentran en la FIGURA No. A. 4. El tiempo de ejecución de cada comando variará en función de las características del ordenador. En caso de aparezca un mensaje de error, revisar la lista de opciones para corregir los errores. El listado se despliega en la misma página donde están los comandos de instalación dentro de “Problemas de Instalación”.

FIGURA No. A. 4: COMANDOS PARA UNA NUEVA INSTALACIÓN.

New Installation

OpenFOAM and Paraview can be simply installed using the `apt` package management tool. The user will need to provide superuser password authentication when executing the following commands with `sudo`.

1. Copy and paste the following in a **terminal prompt** (*Applications → Accessories → Terminal*) to add `dl.openfoam.org` to the list of software repositories for `apt` to search, and to add the public key (`gpg.key`) for the repository to enable package signatures to be verified.

```
sudo add-apt-repository http://dl.openfoam.org/ubuntu
sudo sh -c "wget -O - http://dl.openfoam.org/gpg.key | apt-key add -"
```

****Note: This only needs to be done once for a given system**

2. Update the `apt` package list to account for the new download repository location

```
sudo apt-get update
```

3. Install OpenFOAM (30 in the name refers to version 3.0.1)

```
sudo apt-get -y install openfoam30
```

4. Install Paraview (44 in the name refers to version 4.4.0)

****Note, Ubuntu 14.04.2 users: see first note in Installation Problems below****

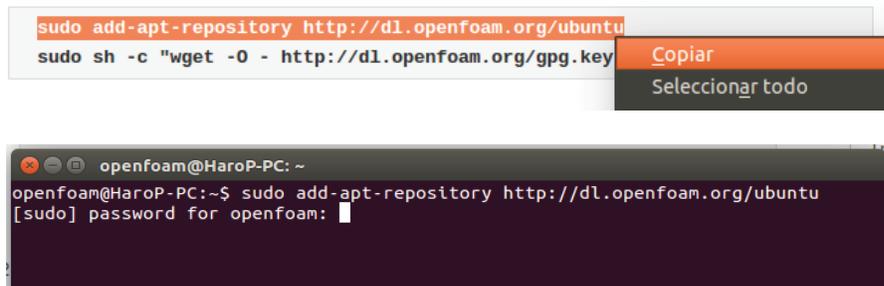
```
sudo apt-get -y install paraviewopenfoam44
```

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FUENTE: Página web: <http://openfoam.org/download/3-0-1-ubuntu/>

5. Las siguientes figuras muestran el procedimiento indicado en el numeral anterior. Si aparece un mensaje de ingreso de contraseña, se debe ingresar la contraseña del usuario del sistema operativo.

FIGURA No. A. 5: NUEVA INSTALACIÓN, PRIMER COMANDO DENTRO DE LA PARTE 1.

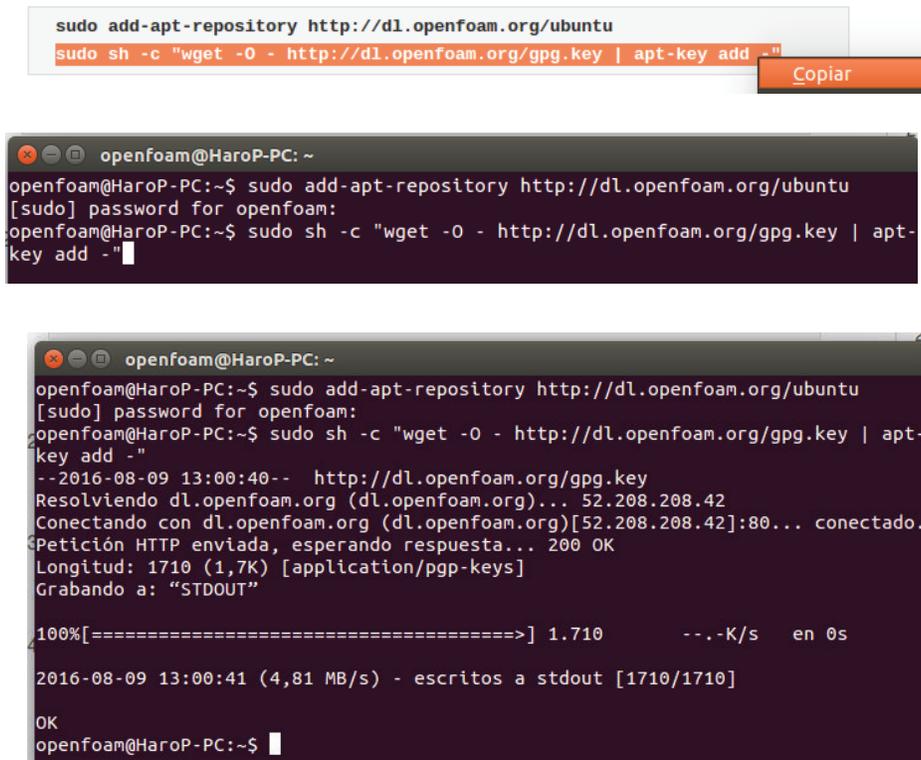


```

sudo add-apt-repository http://dl.openfoam.org/ubuntu
sudo sh -c "wget -O - http://dl.openfoam.org/gpg.key"
  
```

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FIGURA No. A. 6: NUEVA INSTALACIÓN, SEGUNDO COMANDO DENTRO DE LA PARTE 1.



```

sudo add-apt-repository http://dl.openfoam.org/ubuntu
sudo sh -c "wget -O - http://dl.openfoam.org/gpg.key | apt-key add -"
  
```

```

openfoam@HaroP-PC:~$ sudo add-apt-repository http://dl.openfoam.org/ubuntu
[sudo] password for openfoam:
openfoam@HaroP-PC:~$ sudo sh -c "wget -O - http://dl.openfoam.org/gpg.key | apt-key add -"
--2016-08-09 13:00:40-- http://dl.openfoam.org/gpg.key
Resolviendo dl.openfoam.org (dl.openfoam.org)... 52.208.208.42
Conectando con dl.openfoam.org (dl.openfoam.org)[52.208.208.42]:80... conectado.
Petición HTTP enviada, esperando respuesta... 200 OK
Longitud: 1710 (1,7K) [application/pgp-keys]
Grabando a: "STDOUT"

100%[=====] 1.710 --.-K/s en 0s

2016-08-09 13:00:41 (4,81 MB/s) - escritos a stdout [1710/1710]
OK
openfoam@HaroP-PC:~$
  
```

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FIGURA No. A. 7: NUEVA INSTALACIÓN, COMANDO DENTRO DE LA PARTE 2.

```

sudo apt-get update
Copiar
Seleccionar todo
install OpenFOAM (30

openfoam@HaroP-PC: ~
openfoam@HaroP-PC:~$ sudo add-apt-repository http://dl.openfoam.org/ubuntu
[sudo] password for openfoam:
openfoam@HaroP-PC:~$ sudo sh -c "wget -O - http://dl.openfoam.org/gpg.key | apt-
key add -"
--2016-08-09 17:48:44-- http://dl.openfoam.org/gpg.key
Resolviendo dl.openfoam.org (dl.openfoam.org)... 52.208.208.42
Conectando con dl.openfoam.org (dl.openfoam.org)[52.208.208.42]:80... conectado.
Petición HTTP enviada, esperando respuesta... 200 OK
Longitud: 1710 (1,7K) [application/pgp-keys]
Grabando a: "STDOUT"

100%[=====>] 1.710      --.-K/s   en 0s

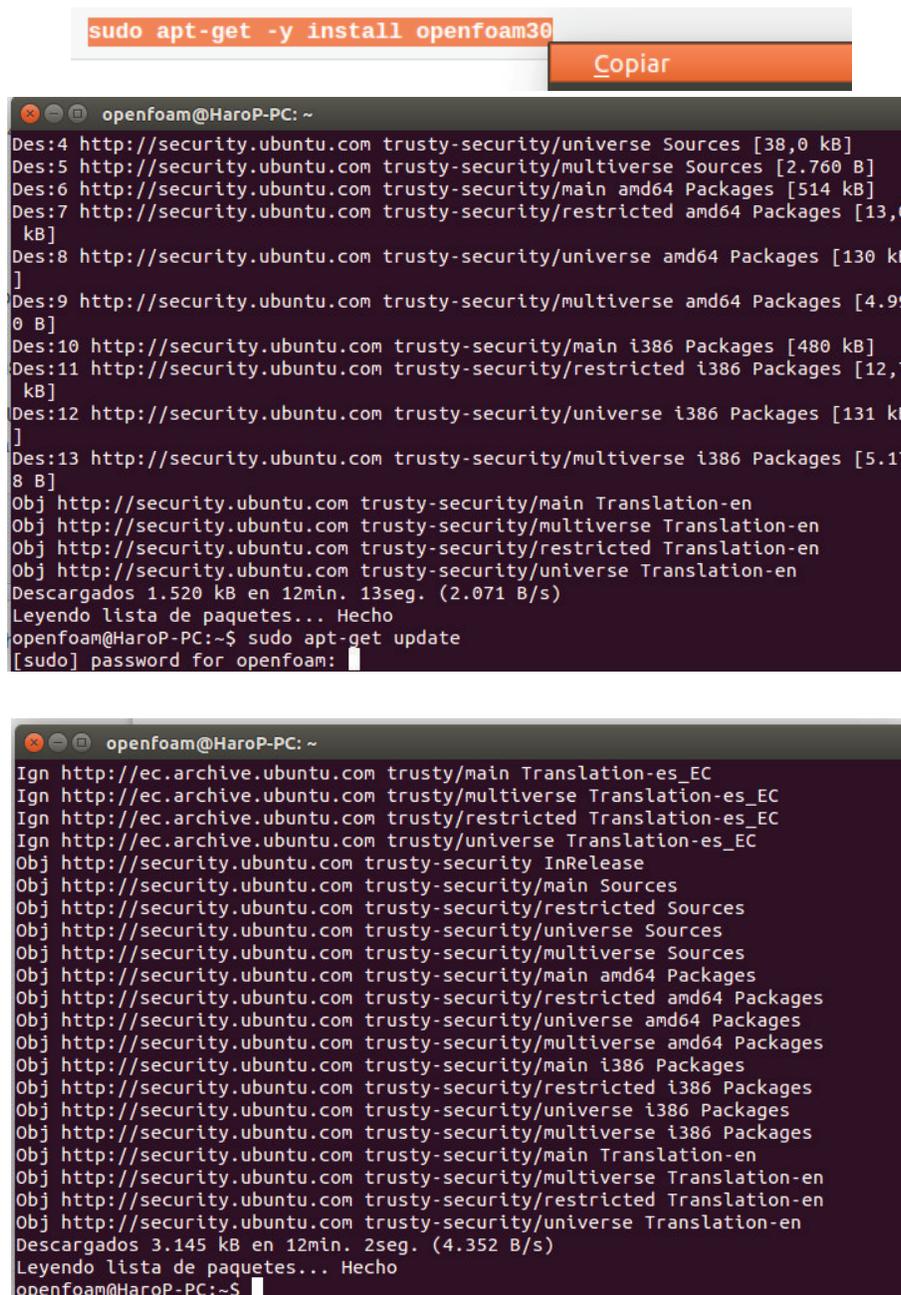
2016-08-09 17:48:45 (6,88 MB/s) - escritos a stdout [1710/1710]

OK
openfoam@HaroP-PC:~$ sudo apt-get update
Des:3 http://security.ubuntu.com trusty-security/restricted Sources [4.064 B]
Des:4 http://security.ubuntu.com trusty-security/universe Sources [38,0 kB]
Des:5 http://security.ubuntu.com trusty-security/multiverse Sources [2.760 B]
Des:6 http://security.ubuntu.com trusty-security/main amd64 Packages [514 kB]
Des:7 http://security.ubuntu.com trusty-security/restricted amd64 Packages [13,0
kB]
Des:8 http://security.ubuntu.com trusty-security/universe amd64 Packages [130 kB
]
Des:9 http://security.ubuntu.com trusty-security/multiverse amd64 Packages [4.99
0 B]
Des:10 http://security.ubuntu.com trusty-security/main i386 Packages [480 kB]
Des:11 http://security.ubuntu.com trusty-security/restricted i386 Packages [12,7
kB]
Des:12 http://security.ubuntu.com trusty-security/universe i386 Packages [131 kB
]
Des:13 http://security.ubuntu.com trusty-security/multiverse i386 Packages [5.17
8 B]
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/main Translation-en
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/multiverse Translation-en
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/restricted Translation-en
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/universe Translation-en
Descargados 1.520 kB en 12min. 13seg. (2.071 B/s)
Leyendo lista de paquetes... Hecho
openfoam@HaroP-PC:~$

```

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FIGURA No. A. 8: NUEVA INSTALACIÓN, COMANDO DENTRO DE LA PARTE 3.



```

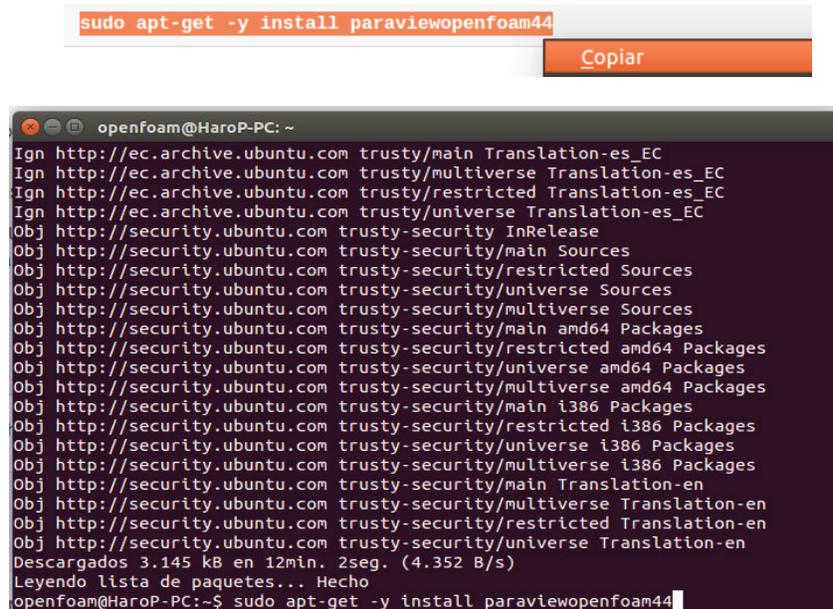
sudo apt-get -y install openfoam30
Copiar

openfoam@HaroP-PC: ~
Des:4 http://security.ubuntu.com trusty-security/universe Sources [38,0 kB]
Des:5 http://security.ubuntu.com trusty-security/multiverse Sources [2.760 B]
Des:6 http://security.ubuntu.com trusty-security/main amd64 Packages [514 kB]
Des:7 http://security.ubuntu.com trusty-security/restricted amd64 Packages [13,0
kB]
Des:8 http://security.ubuntu.com trusty-security/universe amd64 Packages [130 kB
]
Des:9 http://security.ubuntu.com trusty-security/multiverse amd64 Packages [4.99
0 B]
Des:10 http://security.ubuntu.com trusty-security/main i386 Packages [480 kB]
Des:11 http://security.ubuntu.com trusty-security/restricted i386 Packages [12,7
kB]
Des:12 http://security.ubuntu.com trusty-security/universe i386 Packages [131 kB
]
Des:13 http://security.ubuntu.com trusty-security/multiverse i386 Packages [5.17
8 B]
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/main Translation-en
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/multiverse Translation-en
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/restricted Translation-en
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/universe Translation-en
Descargados 1.520 kB en 12min. 13seg. (2.071 B/s)
Leyendo lista de paquetes... Hecho
openfoam@HaroP-PC:~$ sudo apt-get update
[sudo] password for openfoam:

openfoam@HaroP-PC: ~
Ign http://ec.archive.ubuntu.com trusty/main Translation-es_EC
Ign http://ec.archive.ubuntu.com trusty/multiverse Translation-es_EC
Ign http://ec.archive.ubuntu.com trusty/restricted Translation-es_EC
Ign http://ec.archive.ubuntu.com trusty/universe Translation-es_EC
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security InRelease
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/main Sources
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/restricted Sources
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/universe Sources
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/multiverse Sources
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/main amd64 Packages
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/restricted amd64 Packages
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/universe amd64 Packages
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/multiverse amd64 Packages
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/main i386 Packages
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/restricted i386 Packages
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/universe i386 Packages
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/multiverse i386 Packages
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/main Translation-en
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/multiverse Translation-en
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/restricted Translation-en
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/universe Translation-en
Descargados 3.145 kB en 12min. 2seg. (4.352 B/s)
Leyendo lista de paquetes... Hecho
openfoam@HaroP-PC:~$

```

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FIGURA No. A. 9: NUEVA INSTALACIÓN, COMANDO DENTRO DE LA PARTE 4.


```

sudo apt-get -y install paraviewopenfoam44
Copiar

openfoam@HaroP-PC: ~
Ign http://ec.archive.ubuntu.com trusty/main Translation-es_EC
Ign http://ec.archive.ubuntu.com trusty/multiverse Translation-es_EC
Ign http://ec.archive.ubuntu.com trusty/restricted Translation-es_EC
Ign http://ec.archive.ubuntu.com trusty/universe Translation-es_EC
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security InRelease
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/main Sources
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/restricted Sources
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/universe Sources
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/multiverse Sources
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/main amd64 Packages
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/restricted amd64 Packages
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/universe amd64 Packages
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/multiverse amd64 Packages
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/main i386 Packages
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/restricted i386 Packages
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/universe i386 Packages
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/multiverse i386 Packages
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/main Translation-en
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/multiverse Translation-en
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/restricted Translation-en
Obj http://security.ubuntu.com trusty-security/universe Translation-en
Descargados 3.145 kB en 12min. 2seg. (4.352 B/s)
Leyendo lista de paquetes... Hecho
openfoam@HaroP-PC:~$ sudo apt-get -y install paraviewopenfoam44

```

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

6. Una vez que se ha colocado el cuarto comando, aparece un mensaje donde se solicita aprobación para instalar la aplicación “ParaView”, en el caso que dicha aplicación no se encuentre instalada se debe confirmar presionando la letra “Y”. Inmediatamente se debe cerrar el terminal.
7. A continuación, se procede a realizar la configuración de usuario, utilizando los comandos que se muestran en la FIGURA No. A.10 y se deben pegar en “Terminal” de la misma manera como se realizó en el proceso del numeral 5.

FIGURA No. A. 10: COMANDOS PARA CONFIGURACIÓN DE USUARIO

User Configuration

In order to use the installed OpenFOAM package, complete the following

1. Open the `.bashrc` file in the user's home directory in an editor, e.g. by typing in a terminal window (note the dot)

```
gedit ~/.bashrc
```

2. At the bottom of that file, add the following line (see **Note 1**) and save the file

```
source /opt/openfoam30/etc/bashrc
```

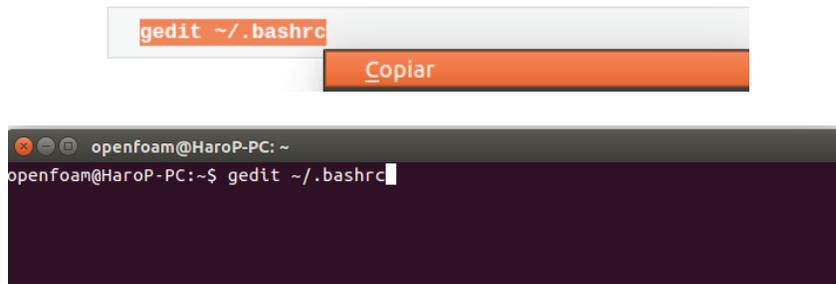
3. Open a **new** terminal window (see **Note 2**) and test that the `simpleFoam` application, from the OpenFOAM package, is working by typing

```
simpleFoam -help
```

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FUENTE: Página web: <http://openfoam.org/download/3-0-1-ubuntu/>

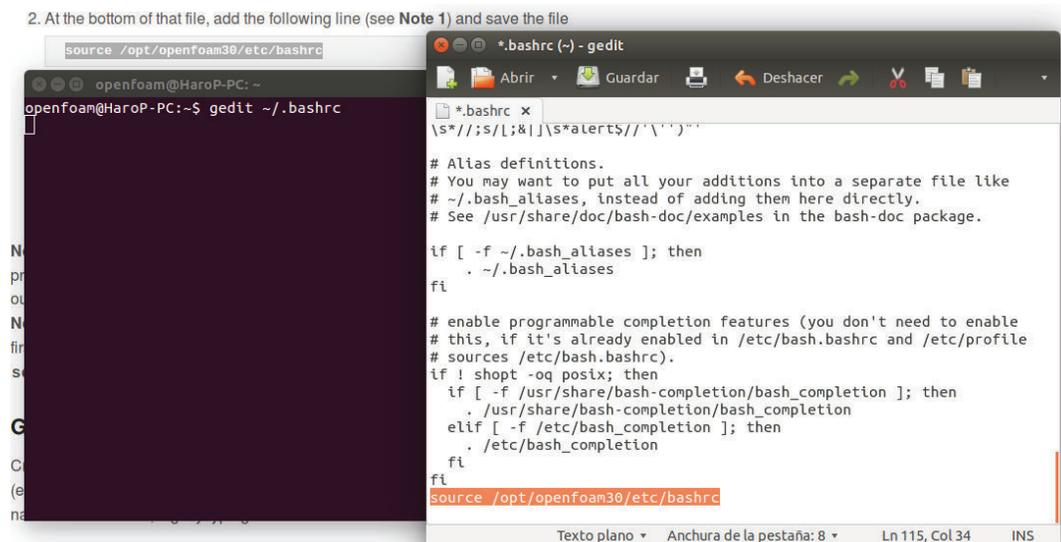
FIGURA No. A. 11: CONFIGURACIÓN DE USUARIO, COMANDO DENTRO DE LA PARTE 1.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

8. Cuando se ha ejecutado el primer comando, aparecerá una nueva ventana de información, dentro de esta nueva ventana se debe pegar en la parte inferior, el segundo comando, tal como se muestra en la FIGURA No. A.12. Inmediatamente se procede a Guardar y Cerrar la ventana.

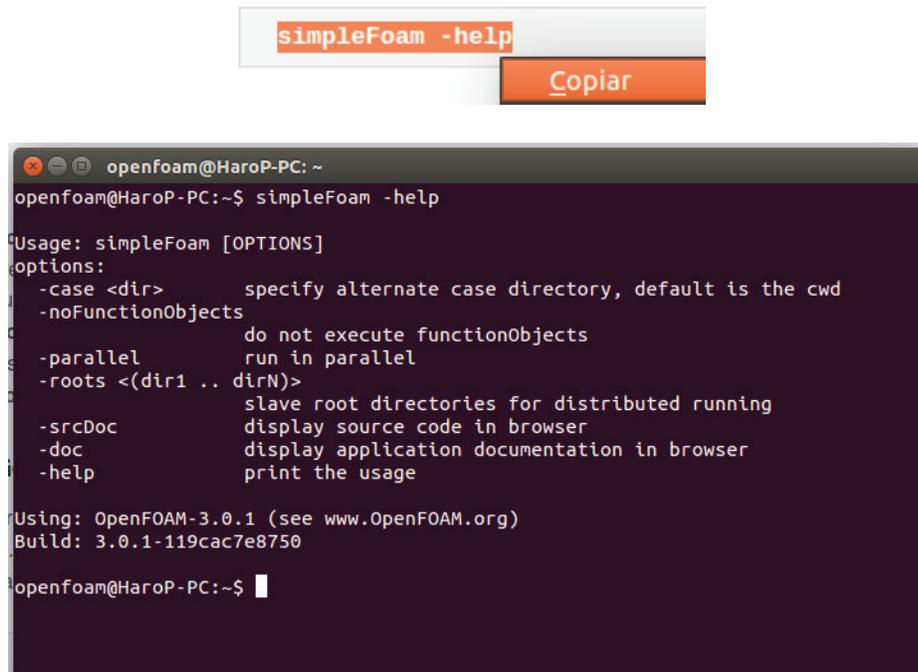
FIGURA No. A. 12: CONFIGURACIÓN DE USUARIO, COMANDO DENTRO DE LA PARTE 2.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

9. Para culminar con la configuración de usuario, se debe copiar y pegar el comando 3 dentro de la aplicación "Terminal". Ver FIGURA No. A.13.

FIGURA No. A. 13: CONFIGURACIÓN DE USUARIO, COMANDO DENTRO DE LA PARTE 3.



The image shows a terminal window with the following content:

```

openfoam@HaroP-PC: ~
openfoam@HaroP-PC:~$ simpleFoam -help

Usage: simpleFoam [OPTIONS]
options:
  -case <dir>          specify alternate case directory, default is the cwd
  -noFunctionObjects  do not execute functionObjects
  -parallel           run in parallel
  -roots <(dir1 .. dirN)>
                    slave root directories for distributed running
  -srcDoc            display source code in browser
  -doc              display application documentation in browser
  -help            print the usage

Using: OpenFOAM-3.0.1 (see www.OpenFOAM.org)
Build: 3.0.1-119cac7e8750

openfoam@HaroP-PC:~$

```

above the terminal is a copy button with the text `simpleFoam -help` and a `Copiar` button.

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

10. Ejecutado el tercer comando, se cierra "Terminal" y se procede a descargar desde la página <http://www.openfoam.com/download/install-source.php> los archivos (1) OpenFOAM-v1606+.tgz y (2) ThirdParty-v1606+.tgz.
11. Se crea la carpeta OPENFOAM dentro de la carpeta HOME de Linux. Inmediatamente se copian los archivos (1) y (2) en la carpeta OPENFOAM y se los descomprime en la misma carpeta.
12. Se abre "Terminal" y se siguen las instrucciones indicadas en la FIGURA No. A.14. En primer lugar, se copia el primer comando y se presiona ENTER.

FIGURA No. A. 14: CONFIGURACIÓN DE INICIO, PRIMER COMANDO.

Getting Started

Create a project directory within the `$HOME/OpenFOAM` directory named `<USER>-3.0.1` (e.g. `chris-3.0.1` for user `chris` and OpenFOAM version 3.0.1) and create a directory named `run` within it, e.g. by typing:

```
mkdir -p $FOAM_RUN
```

Copy across the backward facing step example, generate the mesh with `blockMesh` and run the steady flow, incompressible solver `simpleFoam`

```
cd $FOAM_RUN
cp -r $FOAM_TUTORIALS/incompressible/simpleFoam/pitzDaily .
cd pitzDaily
blockMesh
simpleFoam
paraFoam
```

```

mkdir -p $FOAM_RUN
openfoam@HaroP-PC: ~
openfoam@HaroP-PC:~$ simpleFoam -help
Usage: simpleFoam [OPTIONS]
options:
  -case <dir>          specify alternate case directory, default is the cwd
  -noFunctionObjects   do not execute functionObjects
  -parallel            run in parallel
  -roots <(dir1 .. dirN)>
                       slave root directories for distributed running
  -srcDoc              display source code in browser
  -doc                 display application documentation in browser
  -help               print the usage

Using: OpenFOAM-3.0.1 (see www.OpenFOAM.org)
Build: 3.0.1-119cac7e8750
openfoam@HaroP-PC:~$ mkdir -p $FOAM_RUN

```

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

- En segundo lugar, se copian los demás comandos que se muestran en la FIGURA No. A.15. Cabe indicar que estos pueden pegarse tanto individual o colectivamente. Ejecutado este paso, aparecerá la aplicación ParaView tal como se muestra en la FIGURA No. A.16. Además, en la carpeta OPENFOAM se creará una nueva carpeta con el nombre del ordenador junto a la versión del programa. Esto indica que dicho programa se encuentra correctamente instalado.

FIGURA No. A. 15: CONFIGURACIÓN DE INICIO, COMANDOS DE EJECUCIÓN DE PARAVIEW.

```

cd SFOAM_RUN
cp -r SFOAM_TUTORIALS/incompressible/simpleFoam/pitzDaily .
cd pitzDaily
blockMesh
simpleFoam
paraFoam

```

Copiar

```

openfoam@HaroP-PC: ~/OpenFOAM/openfoam-3.0.1/run/pitzDaily
smoothSolver: Solving for Uy, Initial residual = 0.000977894, Final residual =
6.73868e-05, No Iterations 6
GAMG: Solving for p, Initial residual = 0.000761591, Final residual = 6.02052e-
05, No Iterations 5
time step continuity errors : sum local = 0.00284907, global = -0.000320399, cum
ulative = 1.21783
smoothSolver: Solving for epsilon, Initial residual = 0.000117283, Final residu
al = 7.16786e-06, No Iterations 3
smoothSolver: Solving for k, Initial residual = 0.000211639, Final residual = 1
.2388e-05, No Iterations 4
ExecutionTime = 13.39 s  ClockTime = 14 s

SIMPLE solution converged in 298 iterations

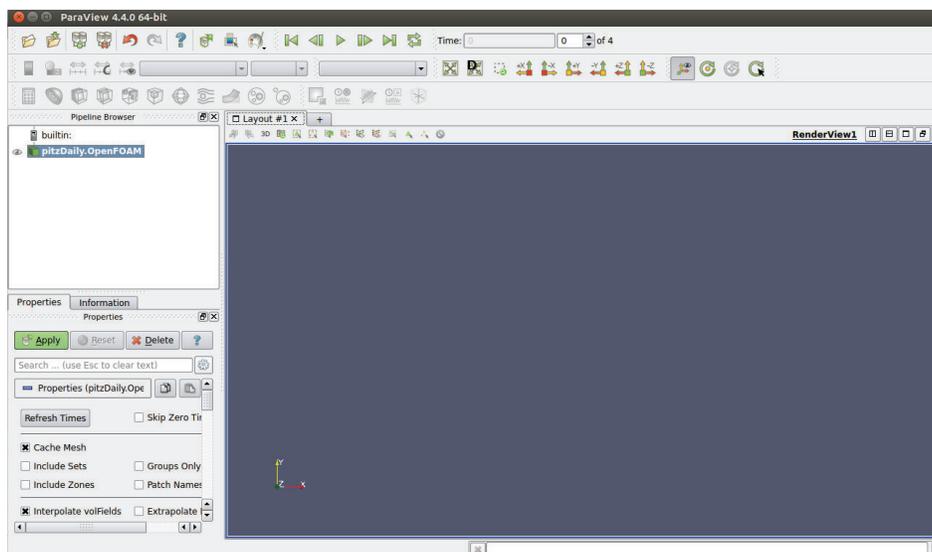
streamLine streamLines output:
  seeded 10 particles
  Tracks:10
  Total samples:10809
  Writing data to "/home/openfoam/OpenFOAM/openfoam-3.0.1/run/pitzDaily/postPr
ocessing/sets/streamLines/298"
End

openfoam@HaroP-PC:~/OpenFOAM/openfoam-3.0.1/run/pitzDaily$ paraFoam

```

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FIGURA No. A. 16: PANTALLA PRINCIPAL DE LA APLICACIÓN PARAVIEW.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

APÉNDICE B

PARÁMETROS PARA EL DESARROLLO DE UNA MALLA ESTRUCTURADA EN EL PROGRAMA GMSH.

En este apéndice se presenta una alternativa para generar la malla del dominio de estudio en el software GMSH. Como ejemplo se recreará una placa dividida en dos secciones.

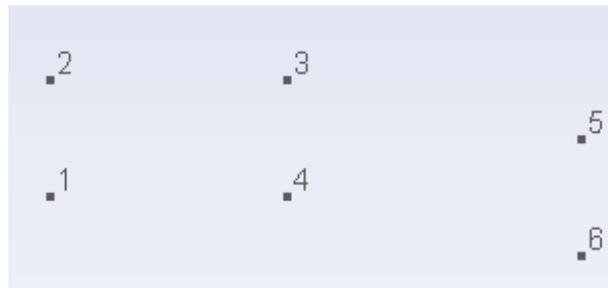
1) DEFINICIÓN DE PUNTOS.

Para la definición de una cara o una superficie que compone el dominio es necesario establecer puntos ordenados $P1(x, y, z, lc)$ dónde lc es la longitud característica. La definición de puntos se lo realizará mediante el siguiente código dentro de un archivo con extensión `[* .txt]` o `[* .geo]`. Para este caso se crearon archivos con extensión `[* .txt]`.

Nombre del archivo: `Points.txt`

```
lc = 0.5;  
Point (1) = {0, 0, 0, lc};  
Point (2) = {0, 2, 0, lc};  
Point (3) = {4, 2, 0, lc};  
Point (4) = {4, 0, 0, lc};  
Point (5) = {9, 1, 0, lc};  
Point (6) = {9, -1, 0, lc};
```

En la FIGURA No. B. 1 se visualizan los puntos coordenados creados en GMSH mediante el anterior código.

FIGURA No. B. 1: PUNTOS COORDENADOS EN GMSH.

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

2) TRAZADO DE LINEAS.

Las líneas que definirán una superficie se las trazará uniendo los puntos coordenados como se muestra en la FIGURA No. B. 2, mediante el siguiente código:

Nombre del archivo: Lines.txt

Include "points.txt"; //código que llama al archivo de puntos.

Line (1) = {2, 3};

Line (2) = {3, 5};

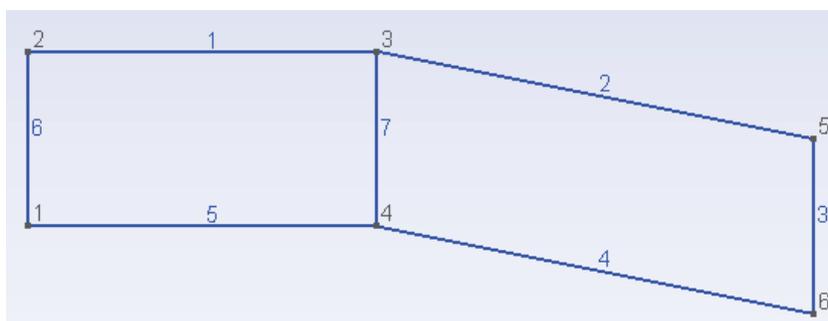
Line (3)= {5, 6};

Line (4)= {6, 4};

Line (5) = {4, 1};

Line (6) = {1, 2};

Line (7) = {3, 4};

FIGURA No. B. 2: DEFICIÓN DE LINEAS MEDIANTE LA UNIÓN DE PUNTOS.

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

3) SUPERFICIES.

La creación de superficies planas se la realiza con el uso del comando "Line Loop" el cual cierra el perímetro que conformará la superficie plana uniendo líneas, se considerará la dirección de creación de estas. Y el comando "Plane Surface" que dará el nombre a la superficie plana. En la FIGURA No. B.3 se muestran las superficies creadas (200, 201), mediante el código:

```
Include "lines.txt"; //código que llama al archivo de líneas.
```

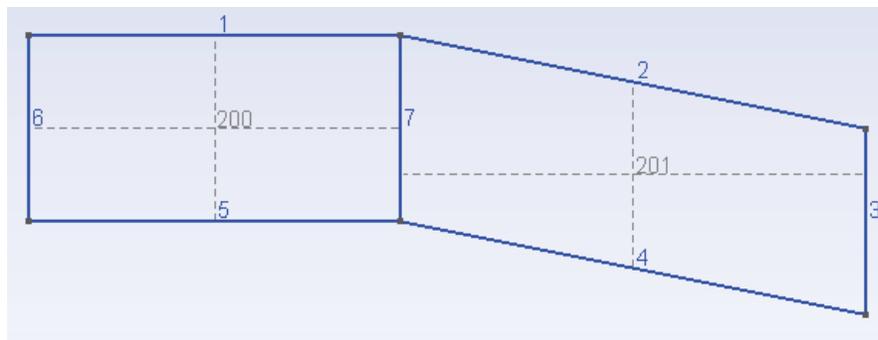
```
Line Loop (100) = {1, 7, 5, 6};
```

```
Plane Surface (200) = {100};
```

```
Line Loop (101) = {3, 4, -7, 2};
```

```
Plane Surface (201) = {101};
```

FIGURA No. B. 3: ELABORACIÓN DE SUPERFICIES PLANAS.

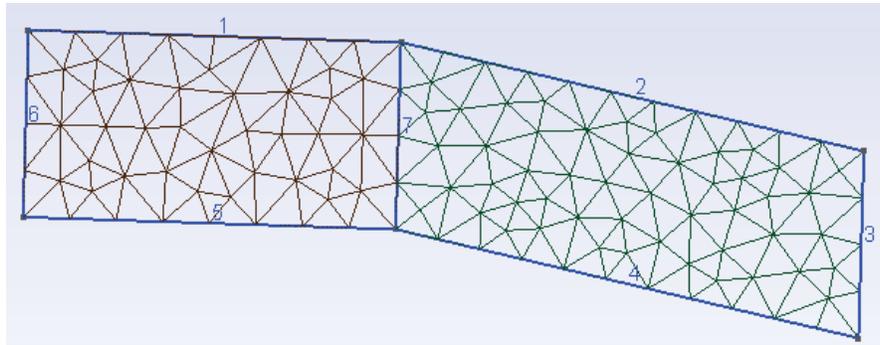


ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

4) REFINAMIENTO EN EL AUTOMALLADO DE GMSH - 2D.

En la FIGURA No. B. 4 se indica el resultado del automallado 2D. El resultado es una malla no estructurada, ya que como se puede observar sus elementos son triángulos. El número de segmentos en el que se dividirá una línea dependerá de la longitud característica (l_c), la cual se definió en la creación de los puntos coordenados. El número de segmentos será igual a la longitud de la línea (L) dividida para la longitud característica (l_c).

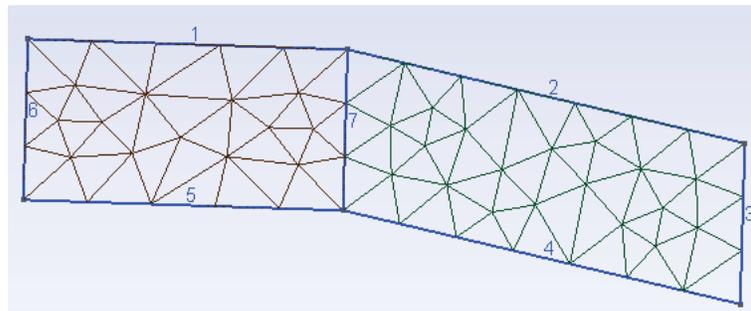
FIGURA No. B. 4: DETALLES DEL AUTOMALLADO EN GMSH CONSIDERANDO LA LONGITUD CARACTERISTICA (l_c).



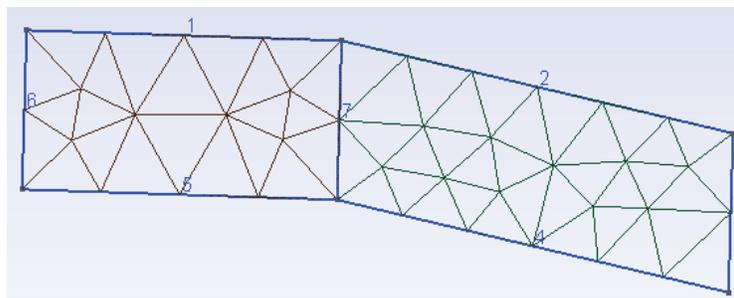
ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

Variando el valor de l_c se podrá refinar la malla. Si l_c aumenta en su valor, el refinamiento decrece y si l_c disminuye, el refinamiento aumenta según como se indica en la FIGURA No. B. 5.

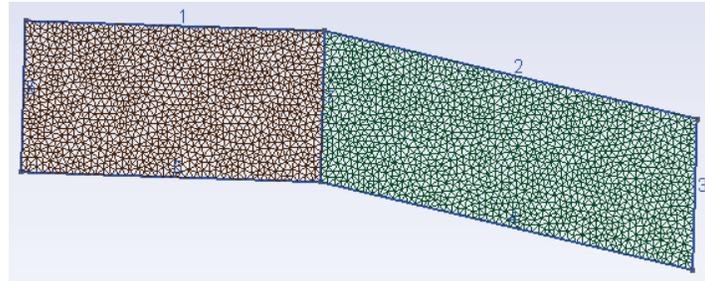
FIGURA No. B. 5: DETALLES DEL AUTOMALLADO EN GMSH VARIANDO LOS VALORES DE LA LONGITUD CARACTERISTICA (l_c).



a) $l_c = 0.8$



b) $l_c = 1$



c) $lc = 0.1$

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

5) Función “TRANSFINITE LINE”.

Usando la función “TRANSFINITE LINE” es posible obtener diferentes distribuciones del mallado, ya sea que el refinamiento sea mayor al inicio o al final de las líneas que conforman la superficie como se indica en la FIGURA No. B. 6 obtenida mediante el siguiente código:

Include "lines.txt"; //código que llama al archivo de líneas.

//superficie 200

na = 20;

ra = 1;

Transfinite Line {1} = na Using Progression ra;

Transfinite Line {5} = na Using Progression 1/ra;

//superficie 201

nb = 20;

rb = 1;

Transfinite Line {2} = nb Using Progression rb;

Transfinite Line {4} = nb Using Progression 1/rb;

//superficie 200 y 201

nc = 5;

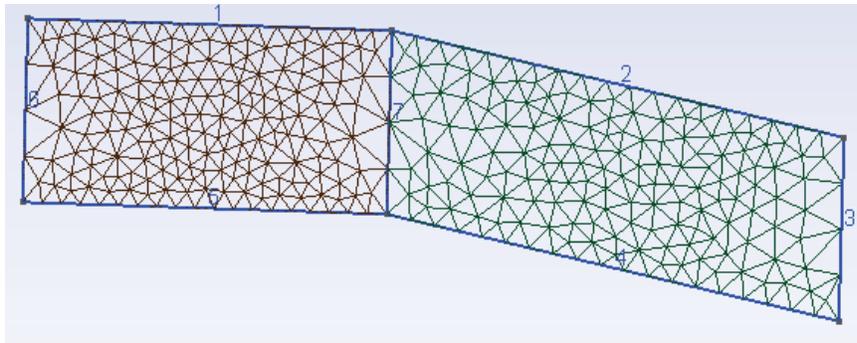
rc = 1;

Transfinite Line {6} = nc Using Progression 1/rc;

Transfinite Line {7} = nc Using Progression 1/rc;

Transfinite Line{3} = nc Using Progression 1/rc;

FIGURA No. B. 6: REFINAMIENTO DE LA MALLA USANDO LA FUNCIÓN “TRANSFINITE LINE”.



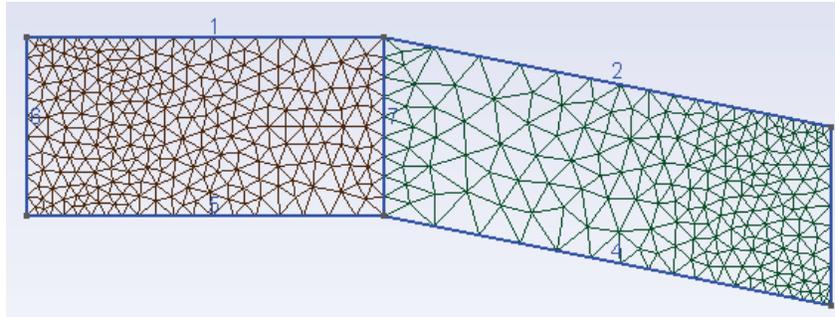
ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

Los valores de n y r definirán como estará la distribución de los elementos en el refinamiento. El valor de n indica en cuantos puntos se va a dividir una línea y el valor de r hacia qué lado de la línea se va a realizar el mayor refinamiento, sea este al inicio o al final de la misma. Como un valor patrón para r se usará 1, donde si r aumenta el refinamiento será mayor al inicio de la línea y si r disminuye el refinamiento será mayor al final de la línea.

En la FIGURA No. B. 7 se muestra el refinamiento de la superficie 200 y 201, donde $r_a=1.05$ obteniendo mayor refinamiento al inicio de las líneas 1 y 6 para la superficie 200, y para la superficie 201 $r_b = 0.905$ obteniendo mayor refinamiento al final de las líneas 2 y 4.

El inicio o final de una línea se define de acuerdo como se realizó la unión de los dos puntos (paso 2) para la conformación de la misma.

FIGURA No. B. 7: REFINAMIENTO DE MALLA USANDO LAS FUNCIONES “TRANSFINITE LINE” Y “USING PROGRESSION” VARIANDO EL VALOR DEL PARÁMETRO “r”.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

Para los casos anteriores se usó la función “Using Progression” la que permite que el refinamiento se pueda dar de manera progresiva al inicio o final de una línea.

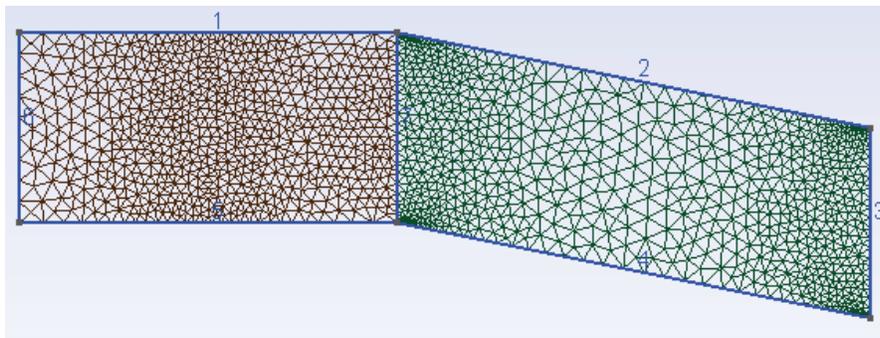
A continuación se mostrará los casos usando la función “Using Bump”, la que permitirá que el refinamiento sea simultáneo y con la misma razón al inicio y al final de una línea, o que el refinamiento sea mayor hacia el centro. Si el valor de r incrementa el refinamiento será mayor al centro y si el valor de r disminuye el refinamiento será mayor a los extremos de la línea. La FIGURA No. B. 8 se obtiene a través del código:

```
//superficie 200, refinamiento hacia el centro.
na = 30;
ra = 3;
Transfinite Line {1} = na Using Bump ra;
Transfinite Line {5} = na Using Bump ra;

//superficie 201, refinamiento hacia los extremos.
nb = 70;
rb = 0.01;
Transfinite Line {2} = nb Using Bump rb;
Transfinite Line {4} = nb Using Bump rb;
```

```
//superficie 200 y 201
nc = 10;
rc = 1;
Transfinite Line {6} = nc Using Progression 1/rc;
Transfinite Line {7} = 20 Using Progression 1/rc;
Transfinite Line {3} = 20 Using Progression 1/rc;
```

FIGURA No. B. 8: REFINAMIENTO DE MALLA USANDO LAS FUNCIONES “TRANSFINITE LINE” Y “USING BUMP” VARIANDO EL VALOR DEL PARÁMETRO “r”.



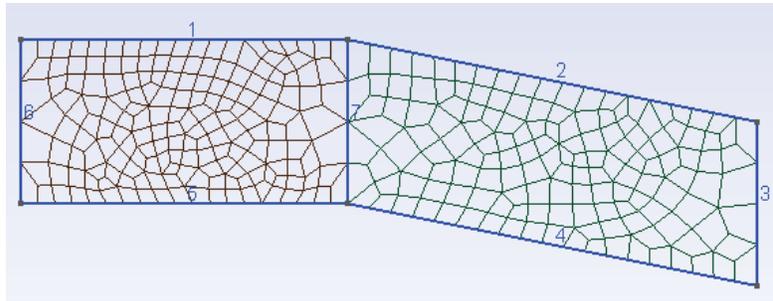
ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

6) RECOMBINACIÓN.

Para generar una malla estructurada es necesario recombinar los triángulos formados para convertirlos en cuadriláteros. Para obtener los cuadriláteros es necesario usar la función “Recombine Surface”. El siguiente código se añadiría al código que se utilizó para obtener la FIGURA No B. 6, obteniendo los resultados que se muestran en la FIGURA No. B. 9.

```
Recombine Surface {200};
Recombine Surface {201};
```

FIGURA No. B. 9: RECOMBINACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL MALLADO USANDO LA FUNCIÓN “RECOMBINE SURFACE”.



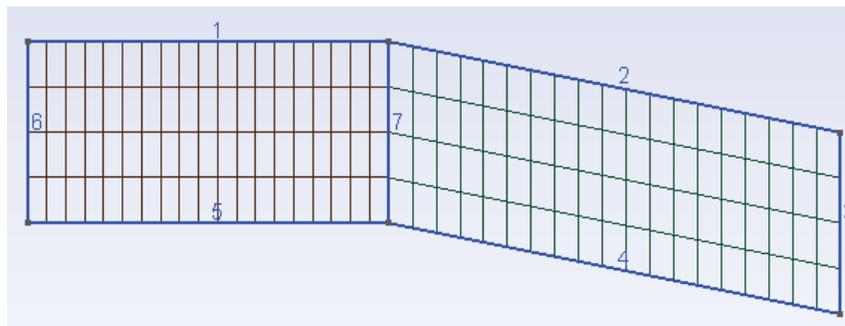
ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

Finalmente para obtener ortogonalidad de los cuadriláteros se usa la función “Transfinite Surface” según el código y FIGURA No. B. 10 que se indican a continuación:

Transfinite Surface {200};

Transfinite Surface {201};

FIGURA No. B. 10: ORTOGONALIDAD DE LOS ELEMENTOS DEL MALLADO USANDO LA FUNCIÓN “TRANSFINITE SURFACE”.



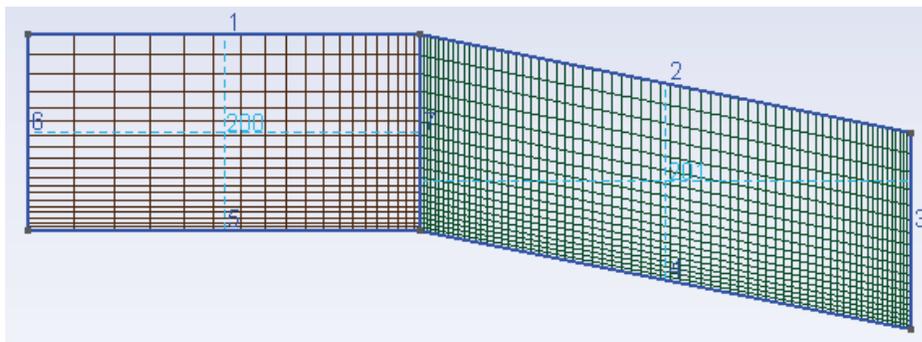
ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

7) MALLA 3D.

De la malla bidimensional creada anteriormente es posible realizar la malla 3D (FIGURA No. B.11 y FIGURA No. B.12) utilizando la función “Extrude” con el siguiente código:

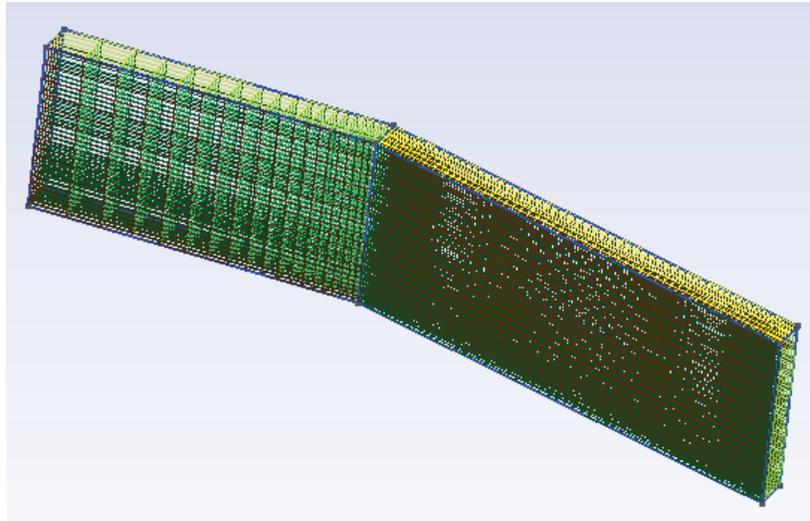
```
e = -0.5; //Valor de la extrusión
L = 5; //Capas de extrusión
Extrude {0, 0, e}
{
  Surface {200, 201};
  Layers {L};
  Recombine;
}
```

FIGURA No. B. 11: MALLADO DE LAS SUPERFICIES CREADAS UTILIZANDO LAS FUNCIONES ANTERIORMENTE DESCRITAS, MALLA 2D.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FIGURA No. B. 12: MALLA 3D USANDO LA FUNCIÓN “EXTRUDE”.

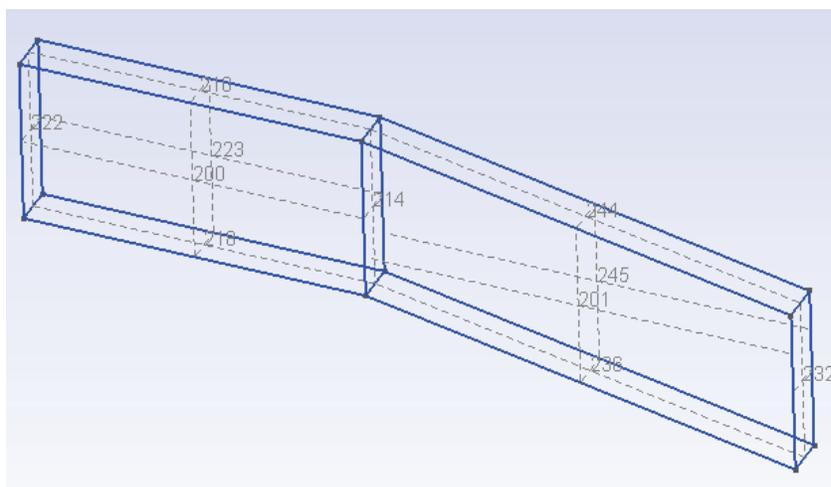


ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

8) NOMBRES DE FRONTERAS.

En la FIGURA No. B. 13 se muestra las superficies totales del caso recreado, a las cuales hay que darles nombres según sea el caso a simular.

FIGURA No. B. 13: NOMBRES DE FRONTERA CONFORMADAS POR LAS SUPERFICIES CREADAS.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

Las fronteras estarán comprendidas por las superficies según como muestra en el código.

Physical Volume ("internal") = {1, 2}; //volúmenes internos.

Physical Surface ("INLET") = {222};

Physical Surface ("OUTLET") = {232};

Physical Surface ("TOP") = {210, 244};

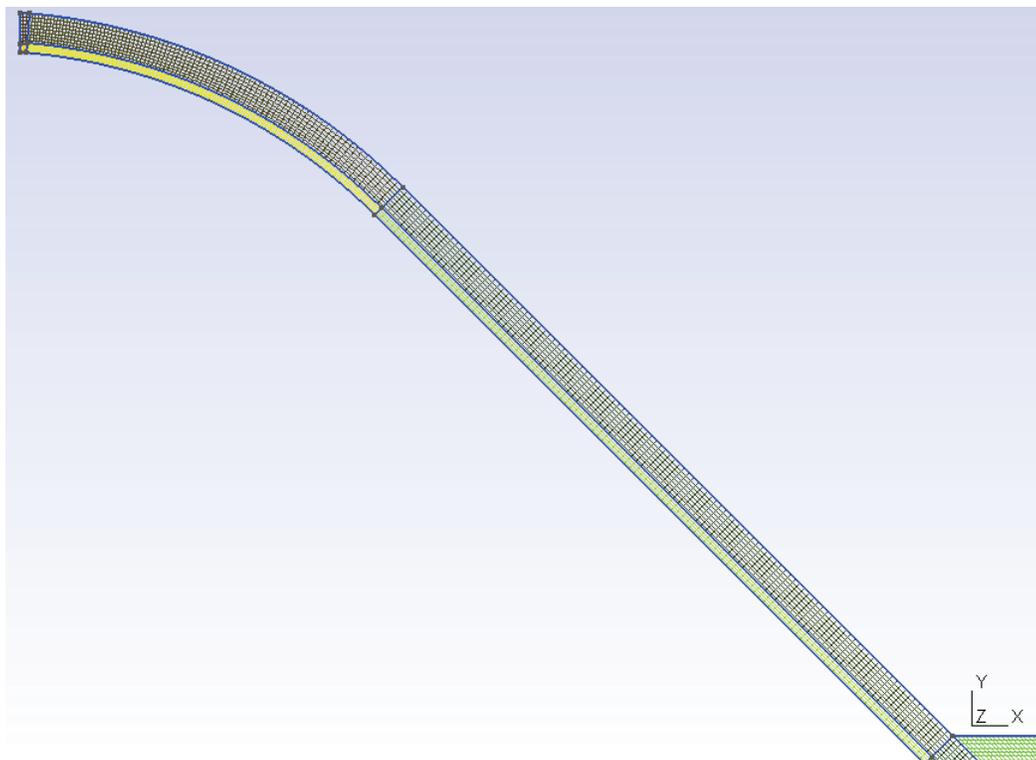
Physical Surface ("BOTTOM") = {218, 236};

Physical Surface ("FRONT") = {200, 201};

Physical Surface ("BACK") = {223, 245};

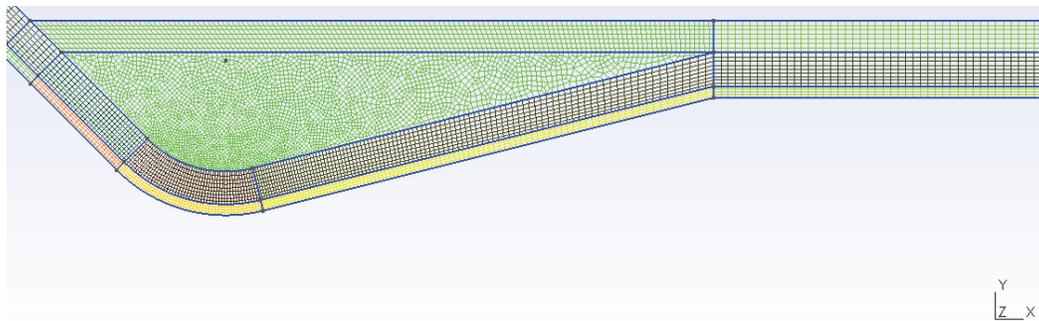
Las superficies planas creadas por el usuario fueron la 200 y 201, las demás superficies se crearán y autonombrarán al ejecutar la función "Extrude".

FIGURA No. B. 14: MALLA ESTRUCTURADA EN LA ENTRADA Y PLANO INCLINADO.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FIGURA No. B. 15: MALLA MIXTA EN EL CUENCO DISIPADOR Y EN LA SALIDA.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

APÉNDICE C

INSTRUCTIVO PARA REALIZAR LA SIMULACIÓN DE UN CASO EN OpenFOAM.

El presente apéndice indica la metodología a seguir para la calibración del modelo numérico utilizado en el proyecto de investigación: “SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UNA RÁPIDA CON FONDO RUGOSO EN EL PAQUETE COMPUTACIONAL OpenFOAM”.

Una vez instalado el paquete computacional OpenFOAM según se indica en el APÉNDICE A se procede a la recreación de un caso. Se tomará como referencia el manual de usuario para OpenFOAM 3.0.1.

PRE-PROCESAMIENTO:

- 1) Físicamente se tiene la interacción de dos fluidos (agua-aire), los cuales tienen tránsito a superficie libre.
- 2) Considerando que se tienen flujos con altos números de Reynolds, se plantea como objetivo comparar las velocidades del flujo en el canal de fuerte pendiente obtenidas para contorno liso frente a contorno rugoso, y validarlos con los resultados obtenidos en el modelo físico.
- 3) Ubicar la carpeta general donde se instaló el programa, para proceder a la selección de las subcarpetas con sus respectivos archivos que compondrán un caso.

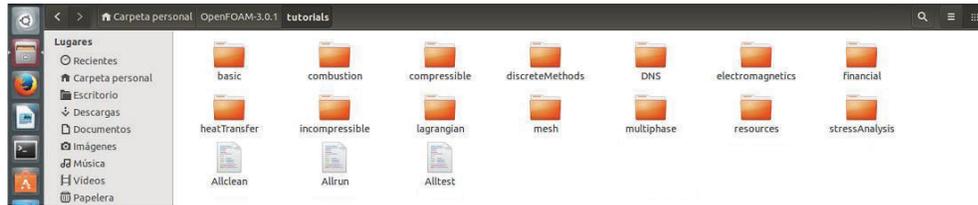
FIGURA No. C. 1: CARPETA DEL PROGRAMA OpenFOAM INSTALADO.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

- 4) Dentro de la carpeta “tutorials” se encuentran las distintas alternativas de simulación con las cuales trabaja OpenFOAM.

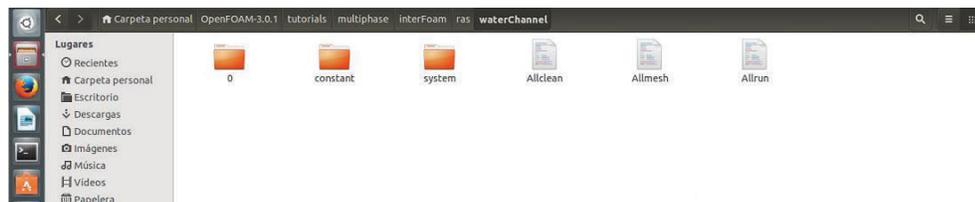
FIGURA No. C. 2: CARPETA “tutorials” DEL PROGRAMA OpenFOAM.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

- 5) Para el caso de flujo bifásico, se elige la carpeta “multiphase” para llegar a la carpeta “waterChannel”, la cual es un caso probado y validado en el programa. Servirá como referencia, puesto que esta carpeta contiene en sus subcarpetas los archivos útiles para realizar la simulación de la rápida. Seguir el directorio: multiphase/interFoam/ras/waterChannel.

FIGURA No. C. 3: ARCHIVOS EN LA CARPETA “waterChannel”.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

- 6) Crear una carpeta con el nombre del caso, dentro de la cual se pegaran las carpetas “0”, “constant” y “system”, con el fin de no alterar la configuración que viene por defecto. Para facilitar el direccionamiento de la carpeta del caso, crearla en “Escritorio”.

FIGURA No. C. 4: CREACIÓN DE LA CARPETA DEL CASO “RAPIDA”.

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

- 7) Verificar que cada carpeta contenga sus respectivos archivos como se indica a continuación la carpeta 0 .

FIGURA No. C. 5: ARCHIVOS EN CARPETA “0”.

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FIGURA No. C. 6: ARCHIVOS EN CARPETA “constant”.

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

FIGURA No. C. 7: ARCHIVOS EN CARPETA “system”.

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

NOTA: No cambiar el orden y nombres de las carpetas así como de los archivos.

- 8) Con la carpeta del caso verificada y lista, se procede realizar la exportación del mallado.

La malla se la puede elaborar en el motor de mallas de OpenFOAM llamado blockMesh, por lo que si se desea profundizar sobre la elaboración de mallas dentro del motor propio se recomienda recurrir a la sección 5.3 del manual de usuario.

También se puede generar la malla externamente en software comercial o de código libre, ya que OpenFOAM convierte gran variedad de formatos externos a formato legible por el programa. En elaboración de mallas se utiliza software de código libre o de uso comercial tales como Salome, GMSH, Tetgen, MeshLab, Fluent, Gambit, entre otros.

En el APÉNDICE B se presenta el manual para generar mallas con software libre “GMSH”.

- 9) Teniendo una malla de buena calidad con sus respectivos contornos se convierte la malla a formato legible por OpenFOAM.
Abrir el Terminal para direccionar la carpeta del caso, donde previamente se ha ubicado el archivo de la malla (MALLA.msh) a convertir.

FIGURA No. C. 8: DIRECCIONAMIENTO Y CONVERSIÓN DE LA MALLA A FORMATO OpenFOAM”



```
openfoam@HaroP-PC: ~/Escritorio/RAPIDA
openfoam@HaroP-PC:~$ cd Escritorio/RAPIDA/
openfoam@HaroP-PC:~/Escritorio/RAPIDA$ gmshToFoam MALLA.msh
```

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

Luego que se ha convertido la malla, ejecutar el comando “checkMesh” para obtener información de la malla y chequear la topología, nombres de contornos, y la geometría.

FIGURA No. C. 9: COMANDO PARA CHEQUEAR LA MALLA.

```
openfoam@HaroP-PC:~/Escritorio/RAPIDAS checkMesh
```

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

Si la malla no tiene errores en la conversión, al final de la información que se despliega aparecerá el mensaje “Mesh OK”.

- 10) Para verificar los archivos de la malla ingresamos a la carpeta “constant” y luego a “polyMesh”.

FIGURA No. C. 10: ARCHIVOS DEL MALLADO.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

Posteriormente configurar los patch de las condiciones de frontera en el archivo “boundary” de acuerdo al tipo de problema (sección 5. 2. 2 del manual de usuario).

```

/*-----* C++ *-----*/
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM:The Open Source CFD Toolbox|
| \\ / O p e r a t i o n | Version: 3.0.1 |
| \\ / A n d | Web: www.OpenFOAM.org |
| \\ / M a n i p u l a t i o n | |
/*-----*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        polyBoundaryMesh;
    location     "constant/polyMesh";
    object       boundary;
}
// *****

6
(
    walls
    {
        type          patch;
        physicalType  patch;
        nFaces        20814;
        startFace     451398;
    }
    atmosphere
    {
        type          patch;
        physicalType  patch;
        nFaces        6045;
        startFace     472212;
    }
    inletWater
    {
        type          patch;
        physicalType  patch;
        nFaces        60;
        startFace     478257;
    }
    bottomr
    {
        type          patch;
        physicalType  patch;
        nFaces        4440;
        startFace     478317;
    }
    bottom
    {
        type          patch;
        physicalType  patch;
        nFaces        2145;
        startFace     482757;
    }
    outlet
    {

```

```

        type          patch;
        physicalType  patch;
        nFaces        300;
        startFace     484902;
    }
)

// ***** //

```

Las condiciones de frontera del dominio de estudio se detallan en la FIGURA No. 4. 7.

11) Configurar los archivos de la carpeta “0”.

El archivo “alpha.water” o de fracción volumétrica se lo configura de acuerdo a la Tabla No. 14.

```

/*-----* C++ -*-----*\
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM:The Open Source CFD Toolbox|
| \\ / O p e r a t i o n | Version: 3.0.1 |
| \\ / A n d | Web: www.OpenFOAM.org |
| \\ / M a n i p u l a t i o n | |
\*-----*\

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0";
    object       alpha.water;
}
// ***** //

dimensions      [0 0 0 0 0 0 0];

internalField   uniform 1;

boundaryField
{
    walls
    {
        type          zeroGradient;
    }
    atmosphere
    {
        type          inletOutlet;
        inletValue     uniform 0;
        value          uniform 0;
    }
}

```



```

    {
        type          kqRWallFunction;
        value         $internalField;
    }

    bottomr
    {
        type          kqRWallFunction;
        value         $internalField;
    }

    walls
    {
        type          kqRWallFunction;
        value         $internalField;
    }

    ".*"
    {
        type          inletOutlet;
        inletValue    $internalField;
        value         $internalField ;
    }
}

// ***** //

```

El archivo “omega” o tasa específica de disipación viscosa se lo configura de acuerdo a la Tabla No. 16.

```

/*-----* C++ -*-----*\
| ===== |
|  \ \ / /  F i e l d      | OpenFOAM:The Open Source CFD Toolbox|
|  \ \ / /  O p e r a t i o n | Version:  3.0.1                |
|  \ \ / /  A n d           | Web:      www.OpenFOAM.org          |
|   \ \ /   M a n i p u l a t i o n |
\*-----*\
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       omega;
}
// ***** //

dimensions      [0 0 -1 0 0 0 0];

internalField   uniform 0.003;

boundaryField
{
    inlet
    {

```

```

        type          fixedValue;
        value          $internalField;
    }

    bottom
    {
        type          omegaWallFunction;
        value          $internalField;
    }

    bottomr
    {
        type          omegaWallFunction;
        value          $internalField;
    }

    walls
    {
        type          omegaWallFunction;
        value          $internalField;
    }

    ".*"
    {
        type          inletOutlet;
        inletValue    $internalField;
        value          $internalField;
    }
}

// ***** //

```

El archivo “nut” o viscosidad cinemática turbulenta se lo configura de acuerdo a la Tabla No. 17.

```

/*-----* C++ *-----*\
| ===== |
| \\      / F i e l d | OpenFOAM:The Open Source CFD Toolbox|
| \\      / O p e r a t i o n | Version: 3.0.1 |
| \\      / A n d | Web: www.OpenFOAM.org |
| \\      / M a n i p u l a t i o n | |
\*-----*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0";
    object       nut;
}

// ***** //

dimensions      [0 2 -1 0 0 0 0];

```

```

internalField    uniform 0;

boundaryField
{
    walls
    {
        type          nutkWallFunction;
        value         uniform 0;
    }

    bottom
    {
        type          nutkRoughWallFunction;
        value         uniform 0;
        Ks            uniform 3e-6;
        Cs            uniform 0.5;
    }
    bottomr
    {
        type          nutkRoughWallFunction;
        value         uniform 0;
        Ks            uniform 3e-6;
        Cs            uniform 0.5;
    }

    ".*"
    {
        type          calculated;
        value         uniform 0;
    }
}

// ***** //

```

El archivo “p_rgh” o presión modificada de interfase se lo configura de acuerdo a la Tabla No. 18.

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== | |
| \\ / Field | OpenFOAM:The Open Source CFD Toolbox|
| \\ / Operation | Version: 3.0.1 |
| \\ / And | Web: www.OpenFOAM.org |
| \\ / Manipulation | |
\*-----*\

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       p_rgh;
}
// ***** //

```

```

dimensions      [1 -1 -2 0 0 0 0];

internalField   uniform 0;

boundaryField
{
    atmosphere
    {
        type          totalPressure;
        p0            uniform 0;
        U             U;
        phi           phi;
        rho           rho;
        psi           none;
        gamma        1;
        value         uniform 0;
    }

    ".*"
    {
        type          fixedFluxPressure;
        value         uniform 0;
    }
}

// ***** //

```

El archivo "U" o de velocidad se lo configura de acuerdo a la Tabla No. 19.

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM:The Open Source CFD Toolbox|
| \\ / O p e r a t i o n | Version: 3.0.1 |
| \\ / A n d | Web: www.OpenFOAM.org |
| \\ / M a n i p u l a t i o n | |
\*-----*\

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volVectorField;
    object       U;
}
// ***** //

dimensions      [0 1 -1 0 0 0 0];

internalField   uniform (1 0 0);

boundaryField
{
    inletWater
    {
        type          flowRateInletVelocity;

```


El archivo “turbulenceProperties” o propiedades de turbulencia se configura de acuerdo a la Tabla No. 22.

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== | |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM:The Open Source CFD Toolbox|
| \\ / O p e r a t i o n | Version: 3.0.1 |
| \\ / A n d | Web: www.OpenFOAM.org |
| \\ / M a n i p u l a t i o n | |
\*-----*-
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "constant";
    object       turbulenceProperties;
}
// ***** //

simulationType RAS;

RAS
{
    RASModel      kOmegaSST;

    turbulence    on;

    printCoeffs  on;
}

// ***** //

```

13) Configurar los archivos de la carpeta “system”.

El archivo “controlDict” o control de tiempo se configura de acuerdo a la Tabla No. 23.

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== | |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM:The Open Source CFD Toolbox|
| \\ / O p e r a t i o n | Version: 3.0.1 |
| \\ / A n d | Web: www.OpenFOAM.org |
| \\ / M a n i p u l a t i o n | |
\*-----*-
FoamFile
{

```



```

        fields
        (
            rhoPhi
        );
    }

    outletFlux
    {
        $inletFlux;
        sourceName    outlet;
    }

    atmosphereFlux
    {
        $inletFlux;
        sourceName    atmosphere;
    }
}

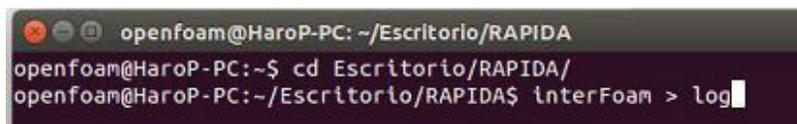
// ***** //

```

Para la configuración de los archivos fvSchemes y fvSolution se recomienda revisar el manual de usuario. Sección 4.4 y sección 4.5 respectivamente.

- 14) Al tener configurados los archivos de las carpetas “0”, “constant” y “system” en el “Terminal” ejecutar el comando “interFoam > log” para dar inicio a la simulación, donde “interFoam” hace referencia al solver utilizado para flujo bifásico y “> log” guardará en un archivo de nombre “log” los residuales de la simulación. Previamente se debe direccionar la carpeta donde se encuentra el caso con sus respectivas carpetas.

FIGURA No. C. 11: COMANDO PARA LA EJECUCIÓN DE LA SIMULACIÓN.



```

openfoam@HaroP-PC: ~/Escritorio/RAPIDA
openfoam@HaroP-PC:~$ cd Escritorio/RAPIDA/
openfoam@HaroP-PC:~/Escritorio/RAPIDA$ interFoam > log

```

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

POS-PROCESAMIENTO CON ParaView:

ParaView es una herramienta del paquete computacional OpenFOAM utilizada para el pos procesamiento de resultados.

- 15) Una vez cumplido el tiempo final de la simulación numérica, ejecutar en el terminal el comando “paraFoam” para desplegar la ventana de la herramienta ParaView:

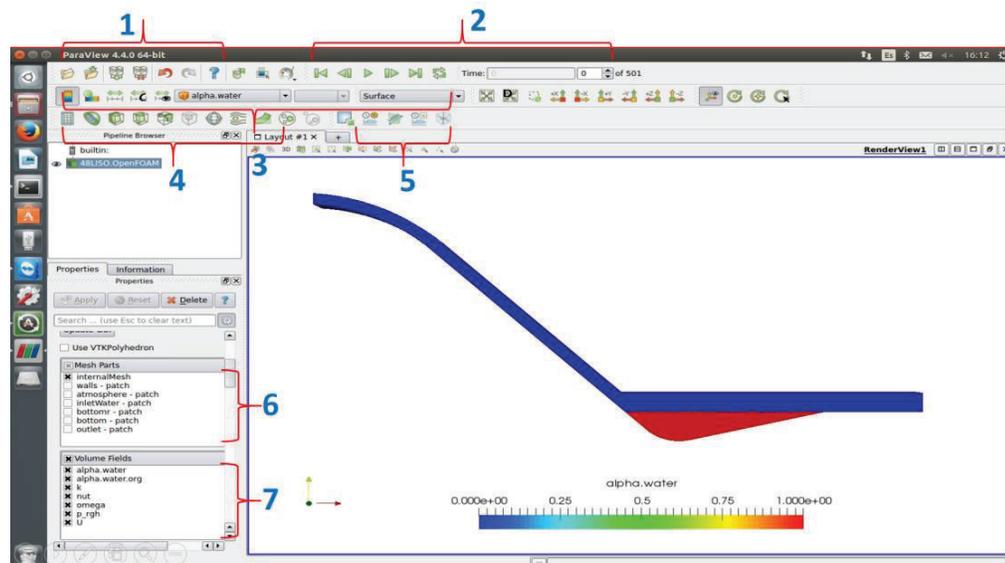
FIGURA No. C. 12: COMANDO PARA LA EJECUCIÓN DE LA SIMULACIÓN.

```
openfoam@HaroP-PC:~/Escritorio/RAPIDA$ paraFoam
```

ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

En la FIGURA No. C. 13 se muestra la ventana principal de ParaView. También se detalla de manera general la función de los diferentes iconos utilizados para la visualización y procesamiento de resultados.

FIGURA No. C. 13: VENTANA DE LA HERRAMIENTA ParaView.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

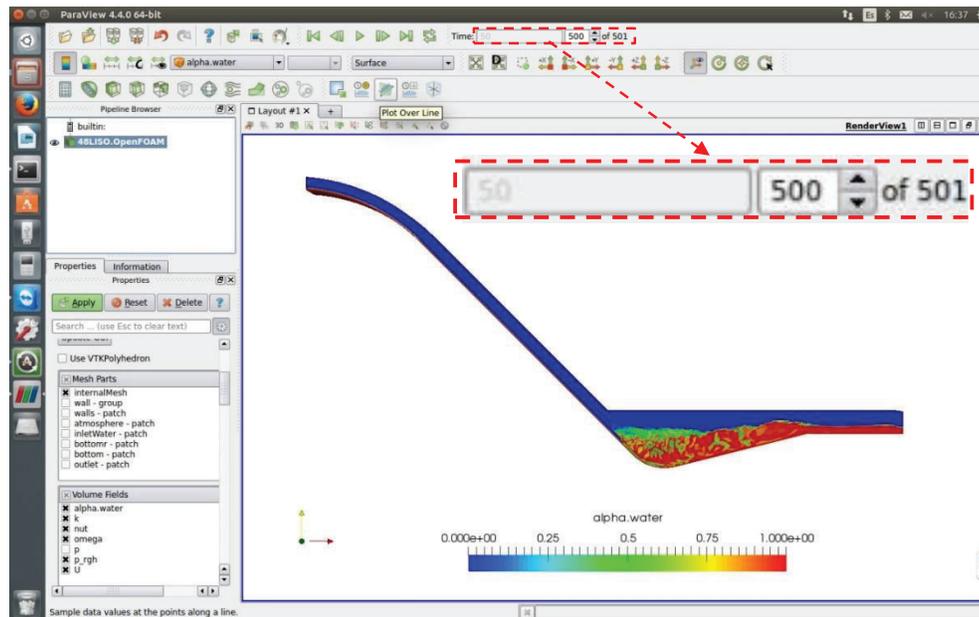
Secciones:

1. Main Controls (control Principal), brinda opción donde podemos crear o abrir un archivo existente.
2. Control VCR, permite animar el dominio de simulación para diferentes intervalos de tiempos configurados.
3. Active Variable Controls (Controles de variables activas), facilita opciones de edición de colores, visualización y representación de variables o de la geometría.
4. Common and Data Analysis Filters (Filtro y Análisis de Datos Comunes), en esta opción es muy importante debido que nos permite representar los resultados de distintas maneras como son: contorno, cortes de secciones y vectores velocidad entre las más utilizadas.
5. Graphic Representation (Representación de Gráficos), permite realizar gráficos de resultados de las diferentes variables.
6. Mesh Parts (Partes de Malla), en esta opción se puede encontrar todas las condiciones de borde dadas al inicio de la simulación.
7. Volumen Fields (Campos de Volumen), se encuentra todas las variables que interviene en la simulación.

Para visualizar el dominio de estudio dar click en Apply () , FIGURA No. C. 13.

La animación del caso se logra bajo la manipulación de los controles o iconos de la sección 2 para un tiempo deseado. En la FIGURA No. C. 14 se visualiza el comportamiento de la fracción volumétrica (α_{water}) en el tiempo 50 (s) de la simulación.

FIGURA No. C. 14: REPRESENTACION ALPHA.WATER PARA 50s.



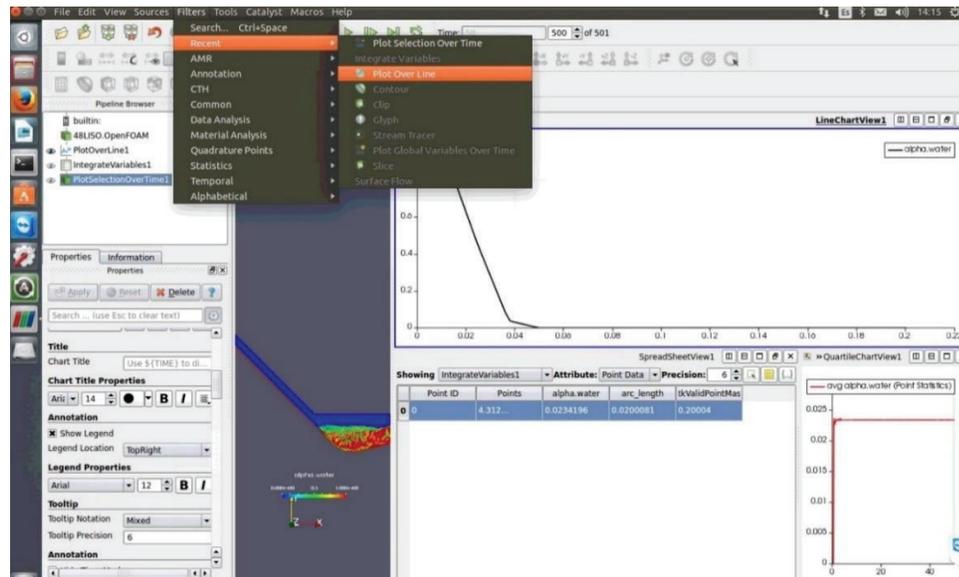
ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

Para obtener la curva de fracción volumétrica configurar en Análisis y Filtro de Datos Comunes (sección 4) o por medio de la barra de menús: Filters/Search/Plot Over Line, donde se deberá ingresar las coordenadas de las secciones deseadas, dar click en Apply.

Para calcular el calado de la sección debemos integrar la fracción volumétrica mediante los siguientes menús: Filters/Search/Integrate Variable, click en Apply.

Obtenidos los resultados de la integración volumétrica se representa gráficamente el calado a través de los menús: Filters/Search/Plot Global of Variables Over Times.

FIGURA No. C. 15: REPRESENTACION GRAFICA DE ALPHA.WATER Y CALADO.

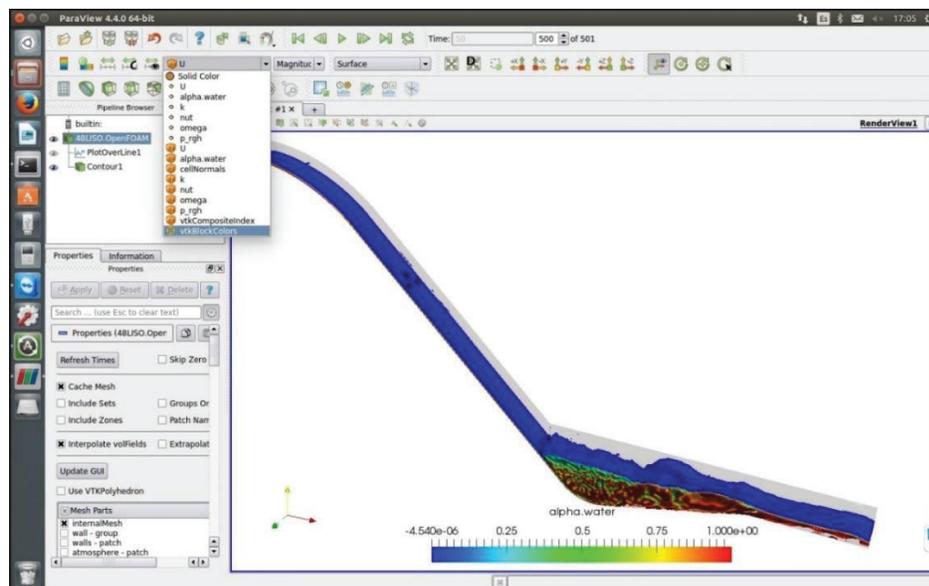


ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.

La representación de resultados en 3D, según se observa en la FIGURA No. C. 16, se lo realiza mediante la secuencia en la barra de menús: Filters/Search/Contour/Apply.

Finalmente, para graficar los vectores de las distintas variables Filters/Search/Glyph/Apply.

FIGURA No. C. 16: VISTA 3D DEL FLUJO.



ELABORADO POR: José Berrones y Oscar Quilligana.