ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

MODELACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DEL MEDIDOR DE CAUDAL TIPO PALMER-BOWLUS APLICANDO EL PROGRAMA FLOW 3D

PROYECTO DE TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGÍSTER EN RECURSOS HÍDRICOS

ING. ROBERTO CARLOS SILVA BASTIDAS
roberto.silva@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. JORGE AUGUSTO TOAPAXI ALVAREZ MSc.

Quito, febrero 2019

DECLARACIÓN

Yo, Roberto Carlos Silva Bastidas, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias 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 normativa institucional vigente.

Ing. Roberto Carlos Silva Bastidas

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue realizado por Roberto Carlos Silva Bastidas bajo mi supervisión.

Ing. Jorge Augusto Toapaxi Álvarez MSc.

DIRECTOR

AGRADECIMIENTO

Son muchas las personas a las que es imperativo extender un agradecimiento, entre estas personas a mi director el Ing. Jorge Toapaxi, por brindarme la oportunidad de ayudar nuevamente a mi Alma Mater en un proyecto, a la Ing. Cristina Torres por toda su ayuda en el presente proyecto, al Dr. Khaled Hamad por su ayuda en la revisión de este proyecto, a mi amada esposa pues su tenacidad y ejemplo fue la fuerza que me impulso a acabar este proyecto, y a ti mi pequeña Franchesca por todas las risas y buenos ratos que hicieron de este proyecto no solo una superación profesional si no también un tiempo que atesoraré en mí corazón.

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mi esposa, tu mi guerrera que por medio de tu tenacidad y ejemplo me diste la fuerza necesaria para seguir adelante, a mi Franchesca Zoé mi hijita que, con sus risitas, intentos de gateo y balbuceos ayudaron en los tiempos de mayor estrés, a mis padres y hermanos sigan adelante buscando sus sueños porque están ahí, este trabajo va dedicado para Ustedes con todo mi corazón.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN II
CERTIFICACIÓN III
AGRADECIMIENTO IV
DEDICATORIA V
ÍNDICE DE CONTENIDO VI
LISTA DE FIGURAS X
ÍNDICE DE CUADROS XIV
RESUMEN XVI
ABSTRACT XVII
PRESENTACIÓN XVIII
CAPÍTULO 1. 1
INTRODUCCIÓN 1
1.1 GENERALIDADES 1
1.2 JUSTIFICACIÓN 2
1.2.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA 2
1.2.2 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA 2
1.2.3 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA 3
1.3 ALCANCE 4
1.4 OBJETIVOS 5
1.4.1 OBJETIVO GENERAL 5
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 5
CAPÍTULO 2. 6
MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE 6

2.1 BASE TEÓRICA 6
2.1.1 MEDIDORES DE CAUDALES 6
2.1.2 DISEÑO DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS 10
2.2 MODELACIÓN HIDRÁULICA (CFD) 17
2.2.1 MODELO FLOW-3D Y SU FUNCIONAMIENTO.....17
2.3 ACTUALIZACIONES DE LA VERSIÓN 11.2 DEL FLOW-3D.....25
2.3.1 PRE CHEQUEO DE LA SIMULACIÓN 25
2.3.2 SOLUCIONADOR 26
2.3.3 POST-PROCESAMIENTO.....28
2.4 ESTADO DEL ARTE 28
CAPÍTULO 3. 32
METODOLOGÍA PARA LA MODELACIÓN EN TRES DIMENSIONES.....32
3.1 DATOS GEOMÉTRICOS Y RESULTADOS OBTENIDOS EN EL MODELO FÍSICO. 32
3.1.1 PARÁMETROS DE DISEÑO 34
MALLADO BÁSICO O UNIFORME 39
MALLADO MULTIBLOQUE CON BLOQUES DE MALLA ACOPLADOS, ANIDADOS, SOLAPADOS Y AJUSTABLES A LA GEOMETRÍA.....40
MALLA ANIDADA 41
MALLA TRASLAPADA 41
3.1.2 PARAMETROS HIDRÁULICOS.....43
3.2 CALIBRACIÓN DEL MODELO Y ANALISIS DE SENSIBILIDAD.....48
3.2.1 DEFINICIÓN DEL TIEMPO DE CORRIDA 48
3.3 VALIDACIÓN DEL MODELO 54
CAPÍTULO 4. 56
RESULTADOS Y DISCUSIONES.....56

4.1 ESCOGIMIENTO DE LOS DIAMETROS DE TUBERIA COMERCIAL PARA LA MODELACIÓN. 56
4.2 MODELACIÓN CFD DE LAS DIFERENTES GEOMETRÍAS 59
4.2.1 MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=16 CM 59
4.2.2 MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=20 CM 65
4.2.3 MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=25 CM 72
4.2.4 MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=40 CM 77
4.3 ANALISIS DE LOS RESULTADOS 83
4.3.1 CURVA DE DESCARGA MEDIDOR PALMER BOWLUS D=16CM 84
4.3.2 CURVA DE DESCARGA MEDIDOR PALMER BOWLUS D=20CM 85
4.3.3 CURVA DE DESCARGA MEDIDOR PALMER BOWLUS D=25CM 86
4.3.4 CURVA DE DESCARGA MEDIDOR PALMER BOWLUS D=40CM 87
CAPÍTULO 5. 89
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 89
5.1 CONCLUSIONES 89
5.2 RECOMENDACIONES 90
5.3 TRABAJOS FUTUROS 91
Bibliografía 93
ANEXOS 94
ANEXO N# 1 - RESULTADOS DE LA MODELACIÓN DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=33 CM 95
ANEXO N# 2 - RESULTADOS DE LA MODELACIÓN DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=16 CM 101
ANEXO N# 3 - RESULTADOS DE LA MODELACIÓN DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=20 CM 107

ANEXO N# 4 - RESULTADOS DE LA MODELACIÓN DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=25 CM.....114

ANEXO N# 5 - RESULTADOS DE LA MODELACIÓN DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=40 CM.....121

ANEXO N#6 128

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 VERTEDERO RECTANGULAR, VERTEDERO TRAPECIAL, VERTEDERO TRIANGULAR, VERTEDERO REDONDEADO. 7
FIGURA 2.2 MEDIDOR TIPO VENTURI. 8
FIGURA 2.3 MEDIDOR TIPO PALMER-BOWLUS. 9
FIGURA 2.4 DIMENSIONES DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS SEGÚN (Ludwig & Ludwig, 1951). 10
FIGURA 2.5 ÁBACO PARA EL CALCULO DE M (PENDIENTE) PARA EL MEDIDOR PALMER -BOWLUS 11
FIGURA 2.6 ÁBACO PARA EL CALCULO du 13
FIGURA 2.7 DIAGRAMA DE FLUJO DEL FUNCIONAMIENTO DEL FLOW-3D.....18
FIGURA 2.8 EJEMPLO DEL PRE CHEQUEO Y ADVERTENCIA EN LOS MATERIALES 25
FIGURA 2.9 EJEMPLO DEL CHEQUEO EN LA CALIDAD DEL MALLADO 26
FIGURA 2.10 EJEMPLO DE UN MODELO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS 27
FIGURA 3.1 DIMENSIONES EN CM DEL MODELO FÍSICO: CANAL PALMER-BOWLUS, INSTALADO EN EL LABORATORIO DOCENTE DE HIDRÁULICA EN EL AÑO 2010. 33
FIGURA 3.2 MODELO CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS 33 CM 34
FIGURA 3.3 DIMENSIONES FUNDAMENTALES DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS 35
FIGURA 3.4 DIMENSIONES DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS DE D=33 (CM) (CORTE).....36
FIGURA 3.5 DIMENSIONES DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS DE D=33 (CM) (PERFIL).....37
FIGURA 3.6 RENDERIZACIÓN DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS DE D=33 (CM) 38
FIGURA 3.7 EJEMPLOS DE MALLADO MULTIBLOQUE CORRECTO E INCORRECTO.....40
FIGURA 3.8 OPCIONES ESCOGIDAS PARA LA GENERACIÓN DEL MALLADO 42

FIGURA 3.9 OPCIONES ESCOGIDAS PARA LA GENERACIÓN DEL MALLADO 42
FIGURA 3.10 OPCIONES ESCOGIDAS PARA LA GENERACIÓN DEL MALLADO 43
FIGURA 3.11 INTRODUCCIÓN DE LA RUGOSIDAD DE LA TUBERÍA DE PVC...44
FIGURA 3.12 CONDICIONES DE BORDE DEL VOLUMEN DE CONTROL 46
FIGURA 3.13 CONDICIONES DE BORDE EN LA PARTE SUPERIOR DEL CANAL 47
FIGURA 3.14 CONDICIONES DE BORDE EN LA ENTRADA DEL CANAL 47
FIGURA 3.15 CONDICIONES DE BORDE EN LA SALIDA DEL CANAL.....48
FIGURA 3.16 INTRODUCCIÓN DEL TIEMPO DE SIMULACIÓN EN EL PROGRAMA 49
FIGURA 3.17 RESULTADOS EN EL TIEMPO DE SIMULACIÓN EN EL PROGRAMA 50
FIGURA 3.18 SIMULACIÓN ESTABLE DEL MODELO.....50
FIGURA 4.1 MAPA DE LAS TUBERIAS DE ALCANTARILLADO UBICADAS EN EL DMQ 57
FIGURA 4.2 DIMENSIONES DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS DE D=16 (CM) (CORTE).....60
FIGURA 4.3 DIMENSIONES DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS DE D=16 (CM) (PERFIL).....60
FIGURA 4.4 MODELO 3D DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=16 CM.....61
FIGURA 4.5 GEOMETRÍA PALMER-BOWLUS D=16 CM 62
FIGURA 4.6 CONDICIONES DE BORDE INICIAL PALMER-BOWLUS D=16 CM .62
FIGURA 4.7 CONDICIONES DE BORDE FINAL PALMER-BOWLUS D=16 CM....63
FIGURA 4.8 EJEMPLO PANTALLA DE RESULTADOS PARA EL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=16 CM 63
FIGURA 4.9 DIMENSIONES DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS DE D=20 (CM) (CORTE).....66
FIGURA 4.10 DIMENSIONES DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS DE D=20 (CM) (PERFIL).....67
FIGURA 4.11 MODELO 3D DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=20 CM.....67

FIGURA 4.12 GEOMETRÍA E INGRESO DE RUGOSIDAD PALMER-BOWLUS D=20 CM 68
FIGURA 4.13 CONDICIONES DE BORDE INICIAL PALMER-BOWLUS D=20 CM69
FIGURA 4.14 CONDICIONES DE BORDE FINAL PALMER-BOWLUS D=20 CM..69
FIGURA 4.15 EJEMPLO PANTALLA DE RESULTADOS PARA EL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=20 CM 70
FIGURA 4.16 DIMENSIONES DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS DE D=25 (CM) (CORTE).....73
FIGURA 4.17 DIMENSIONES DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS DE D=25 (CM) (PERFIL).....73
FIGURA 4.18 MODELO 3D DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=25 CM.....74
FIGURA 4.19 GEOMETRÍA E INGRESO DE RUGOSIDAD PALMER-BOWLUS D=25 CM 74
FIGURA 4.20 CONDICIONES DE BORDE INICIAL PALMER-BOWLUS D=25 CM75
FIGURA 4.21 CONDICIONES DE BORDE FINAL PALMER-BOWLUS D=25 CM..75
FIGURA 4.22 EJEMPLO PANTALLA DE RESULTADOS PARA EL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=25 CM 76
FIGURA 4.23 DIMENSIONES DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS DE D=40 (CM) (CORTE).....78
FIGURA 4.24 DIMENSIONES DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS DE D=40 (CM) (PERFIL).....79
FIGURA 4.25 MODELO 3D DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=40 CM.....79
FIGURA 4.26 GEOMETRÍA E INGRESO DE RUGOSIDAD PALMER-BOWLUS D=40 CM 80
FIGURA 4.27 CONDICIONES DE BORDE INICIAL PALMER-BOWLUS D=40 CM80
FIGURA 4.28 CONDICIONES DE BORDE FINAL PALMER-BOWLUS D=40 CM..81
FIGURA 4.29 EJEMPLO PANTALLA DE RESULTADOS PARA EL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=40 CM 81
FIGURA 4.30 CURVA DE DESCARGA MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=16 CM 85
FIGURA 4.31 CURVA DE DESCARGA MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=20 CM 86
FIGURA 4.32 CURVA DE DESCARGA MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=25 CM 87

FIGURA 4.33 CURVA DE DESCARGA MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=40 CM 88

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 2.1 CALCULO DE LOS PARÁMETROS ADIMENSIONALES EN FUNCIÓN DE LOS DATOS TOMADOS EXPERIMENTALMENTE EN EL CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS 33 CM 15
CUADRO 2.2 ESTRUCTURA DEL PROGRAMA FLOW-3D 19
CUADRO 2.3 ESTADO DEL ARTE EN EL DISEÑO DE MEDIDORES PALMER-BOWLUS Y MODELACIÓN CFD 29
CUADRO 3.1 PRUEBAS REALIZADAS EXPERIMENTALMENTE (Torres & Vásquez, 2010) 45
CUADRO 3.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LA MODELACIÓN Y EL TIEMPO 51
CUADRO 3.3 COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE TURBULENCIA 52
CUADRO 3.4 COMPARACIÓN DE LA RUGOSIDAD DEL MATERIAL 52
CUADRO 3.5 COMPARACIÓN ENTRE LAS LECTURAS OBTENIDAS UTILIZANDO DIFERENTE TAMAÑO DE CELDAS 53
CUADRO 3.6 RESUMEN DE LOS CALADOS CALCULADOS Y LA DIFERENCIA FRENTE A LOS CALADOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE 54
CUADRO 3.7 CURVA DE DESCARGA MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=33 CM 55
CUADRO 4.1 RESUMEN DEL NUMERO DE TUBERIAS RESPECTO A SU DIÁMETRO 58
CUADRO 4.2 RESUMEN DE LOS CAUDALES SIMULADOS PARA EL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=16 CM 64
CUADRO 4.3 RESUMEN DE LOS CALADOS SIMULADOS VS EL RESULTADO TEÓRICO PARA EL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=16CM 65
CUADRO 4.4 RESUMEN DE LOS CAUDALES SIMULADOS PARA EL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=20 CM 71
CUADRO 4.5 RESUMEN DE LOS CALADOS SIMULADOS VS EL RESULTADO TEÓRICO PARA EL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=20 CM 71
CUADRO 4.6 RESUMEN DE LOS CAUDALES SIMULADOS PARA EL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=25 CM 76

CUADRO 4.7 RESUMEN DE LOS CALADOS SIMULADOS VS EL RESULTADO TEÓRICO PARA EL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=25 CM 77
CUADRO 4.8 RESUMEN DE LOS CAUDALES SIMULADOS PARA EL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=20 CM 82
CUADRO 4.9 RESUMEN DE LOS CALADOS SIMULADOS VS EL RESULTADO TEÓRICO PARA EL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=40 CM 82
CUADRO 4.10 ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LABORATORIO VS LA APLICACIÓN DE LA FÓRMULA OBTENIDA POR (Torres & Vásquez, 2010) 83

RESUMEN

La presente tesis ha buscado encontrar las curvas de descarga del medidor Palmer-Bowlus para cuatro diámetros de tuberías comerciales, valiéndose de las herramientas computacionales, específicamente el Software Flow-3D, que es un software CFD, y tiene la capacidad de resolver las ecuaciones de Navier-Stokes en tres dimensiones.

Para poder simular los diferentes escenarios y encontrar las curvas de descarga el programa requiere diferentes datos de entrada como son la geometría, la rugosidad, condiciones de borde, tamaño del mallado, tiempo y tipo de modelación. Debido a esto existe un capítulo entero que se encarga de exponer estos particulares.

La tesis parte de la hipótesis que la modelación CFD entregará resultados confiables que pueden ser utilizados en el campo del diseño y mantenimiento de los sistemas de alcantarillado.

Para esto se utilizará los datos experimentales obtenidos en el estudio realizado por (Torres & Vásquez, 2010), en base a esto se calibrará el modelo inicial y se generará una metodología que servirá para realizar las modelaciones de los cuatro diámetros de tuberías comerciales, estos diámetros serán seleccionados en base a la información provista por EPMAPS, tomando como punto de partida el levantamiento de información de las redes de alcantarillado del Distrito Metropolitano de Quito.

ABSTRACT

This thesis has an objective and is to find the discharge rating curve for the Palmer-Bowlus flume in four different commercial pipe diameters with the help of computational tools, in this case the Flow-3D software, it is an CFD software, and has the capacity to solve the Navier-Stoke equations in three dimensions.

To simulate all the different scenarios and find this discharge rating curves, the programs needs different data input, as the geometry, the surface roughness, initial conditions of the model, the size of the cells, the time and type of the model, due to this, there is an entire chapter that show how to put this input data.

This thesis begins with the hypothesis that the CFD models can provide accurate results and this result can be use in the design stage and in the maintenance stage of the sewers systems.

To accomplish this, We are going to use the experimental data obtain in the study made by (Torres & Vásquez, 2010), based in this We are going to calibrate the initial model and obtain the methodology that We are going to use in the four models of the commercial pipes, this diameters will be chosen base in the information provided by EPMAPS for the sewers systems in the city of Quito as starting point.

PRESENTACIÓN

Esta investigación se ha dividido en 5 capítulos principales. En el primero de ellos se hace la presentación del problema, exponiendo además el objetivo principal, los objetivos específicos y el alcance del presente trabajo.

El Capítulo 2 se centra en el marco teórico tanto de los medidores Palmer-Bowlus como de la modelación CFD, expresamente el programa Flow-3D y el estado del arte del mismo.

El Capítulo 3 expone la metodología para la modelación en tres dimensiones mediante el uso del programa Flow-3D, el método para calibrar el modelo teniendo como base los datos experimentales y la validación del mismo.

En el Capítulo 4 se encuentran la modelación en tres dimensiones de los cuatro medidores Palmer-Bowlus para diferentes diámetros y sus respectivos resultados.

En el Capítulo 5 se encuentran plasmadas las conclusiones, recomendaciones encontradas en el transcurso de la presente tesis además se expone los posibles trabajos futuros que pueden ser realizados a partir del presente trabajo.

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

El medidor Palmer-Bowlus fue desarrollado en 1936 y es una adaptación del medidor Venturi para uso en alcantarillados, la diferencia entre éste y el medidor Venturi es que el medidor tipo Palmer-Bowlus no requiere de la caída en el perfil longitudinal, por lo que puede ser instalado en alcantarillados existentes donde no haya como modificar la solera del alcantarillado (Ludwig & Ludwig, 1951). En el trabajo mencionando anteriormente se presenta el procedimiento para el cálculo de este tipo de medidores y consta de tres partes:

- Selección de la forma del medidor o sus proporciones.
- Obtención de los puntos Q vs H.
- Creación de la curva de descarga.

El primer paso es teórico e implica el escogimiento de las dimensiones fundamentales del medidor tomando en cuenta los factores que controlan el diseño, que en general son el calado y la velocidad del flujo.

El segundo paso para la obtención de los puntos Q vs H utiliza un método de prueba y error simplificado valiéndose de una ayuda gráfica.

La creación de la curva de descarga es resultado de la obtención de los puntos descritos en el paso anterior mediante una técnica semigráfica simple.

En el estudio de (Torres & Vásquez, 2010) se construyó un medidor Palmer-Bowlus y se obtuvo la curva de descarga experimental además como conclusión en dicho estudio se encontró que el medidor es ideal para ser usado en la medición de caudales en sistemas de alcantarillado, debido a que los datos obtenidos con esta estructura son confiables y su sección transversal es compatible con la utilizada en sistemas de alcantarillado.

1.2 JUSTIFICACIÓN

1.2.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

Las estructuras de medición de caudales tales como el canal Parshall y el canal Palmer-Bowlus crean una reducción en la sección del canal y esto obliga al agua a elevarse, y volver a caer hasta la elevación que se tenía sin presencia del aforador. Este proceso presenta una aceleración del flujo que permite establecer una relación matemática entre la elevación y el gasto. Todos los aforadores se pueden representar matemáticamente con la ecuación $Q = C(H_a)^n$ (Eq. 1). Para el medidor Palmer-Bowlus se tiene la curva de calibración teórica que responde a $Q = \left(-0.0358\left(\frac{D}{h_0}\right) + 0.4743\right) g^{\frac{1}{2}}(h_0)^{\frac{5}{2}}$ (Eq. 2) (Torres & Vásquez, 2010)

El paquete informático Flow-3D v11.2 es un software de propósito-general de dinámica de fluidos computacionales (CFD), emplea técnicas numéricas especializadas para resolver las ecuaciones de movimiento de fluidos para obtener transientes, soluciones en tres dimensiones hasta multi-escala, problemas de flujo multi-físicos (Flow Science, Inc., 2016). En el trabajo (Torres & Vásquez, 2010) se obtuvo la curva de descarga experimental del medidor Palmer-Bowlus de 33 cm de diámetro. Por lo que en este trabajo se establecerá las curvas de descarga del medidor Palmer-Bowlus mediante modelación CFD para cuatro diámetros de tuberías comerciales. Esto se logrará partiendo de la calibración del modelo CFD con la curva de descarga experimental del medidor Palmer-Bowlus de 33 cm de diámetro. Una vez calibrado y validado el modelo, se procederá a realizar las diferentes modelaciones de los cuatro diámetros de tuberías comerciales, entregando como resultado las curvas de descarga que pueden ser fácilmente utilizadas en la práctica diaria.

1.2.2 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA

Existen en el mercado aforadores tipo Palmer-Bowlus de una sola pieza para ser adaptados en conductos existentes o a diseñar. Cada aforador se suministra con su respectiva curva de calibración y tablas que definen $h_0 = f(Q)$ (Torres & Vásquez, 2010) sin embargo estos vienen con un costo extra que encarecen el costo total de un proyecto.

En el campo de la dinámica de fluidos computacional ha existido un gran avance en la resolución de las ecuaciones complejas que gobiernan a los fluidos mediante el uso de modelos numéricos que pueden, con cierto grado de aproximación, entregar resultados confiables del funcionamiento hidráulico de las estructuras complejas analizadas (Aulestia, 2017). En la actualidad se aplica el estudio de los problemas hidráulicos a través de CFD que mediante la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes entregan resultados confiables, si a esto le sumamos que gracias al modelo físico realizado en el año 2010, se cuenta con información del funcionamiento real del aforador que será de fundamental importancia en el presente proyecto, pues se partirá de los datos obtenidos por (Torres & Vásquez, 2010) para calibrar el modelo. En el proceso de calibración se encontrará el tamaño de celda adecuado para realizar la corrida (se valorará el tiempo máquina usado versus la confiabilidad de los resultados), la rugosidad, entre los parámetros más relevantes. Esto se llevará a cabo utilizando el programa Flow-3D, este resuelve en tres dimensiones las ecuaciones promediadas de Reynolds – Navier Stokes (RANS) junto con los algoritmos FAVOR y VOF para el contorno sólido y seguimiento de la superficie libre respectivamente (Casa, 2016).

Una vez calibrado el modelo numérico se utilizará estos datos (tamaño de celda, rugosidad, etc.) para realizar las curvas de descarga del mismo medidor para cuatro diámetros de tubería comercial, se definirá la geometría de cada uno de estos medidores de caudal para su fácil construcción, este resultado podrá ser utilizado por las personas que necesiten un medidor de caudal Palmer-Bowlus de manera sencilla, rápida y con excelente confiabilidad, la validación de estas curvas de descarga podrá ser sujeta a investigaciones posteriores.

1.2.3 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA

El canal de aforo Palmer-Bowlus fue desarrollado en 1936 y es una adaptación del canal de aforo Venturi para uso en alcantarillados (Ludwig & Ludwig, 1951), al no existir una forma estandarizada del canal de aforo Palmer-Bowlus según la norma ASTM D5390-93 (aprobada nuevamente el 2013), lo que dificulta la posibilidad de construir un canal de aforo Palmer-Bowlus por que no se cuenta con la información necesaria ni tampoco las curvas de descarga. En el mercado los aforadores que existen son

prefabricados y vienen con su respectiva curva de calibración y tablas que definen $h_0 = f(Q)$ (Torres & Vásquez, 2010). Es decir que para poder usar un canal de aforo Palmer-Bowlus es necesario recurrir a los canales prefabricados lo que implica un incremento del costo de cualquier proyecto.

Este proyecto se encuentra enfocado a realizar la calibración, especificar las dimensiones del canal de aforo Palmer-Bowlus para cuatro diámetros de tubería comercial y entregar las curvas de descarga de los mismos. La geometría de los aforadores según su diámetro podrá ser utilizada en el campo de la ingeniería para la construcción en sitio, las curvas de descarga que se obtendrán serán válidas dentro de los caudales estudiados en el presente proyecto. Las curvas de descarga que se obtendrán podrán ser aplicadas directamente en sitio, facilitando el control y el chequeo de los sistemas de alcantarillado pluvial, sanitario o combinado.

1.3 ALCANCE

El alcance del presente trabajo de titulación tiene como finalidad encontrar las curvas de descarga de cuatro diámetros de tubería de alcantarillado comercial mediante la modelación CFD utilizando el programa comercial FLOW 3D v.11.2, basada esta modelación en la calibración obtenida por el medidor Palmer-Bowlus experimental de diámetro 33 cm realizada por (Torres & Vásquez, 2010) se aclara que en el alcance de este proyecto no se encuentra la validación de estas curvas que podrán ser objeto de un estudio posterior.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar las curvas de descarga del aforador Palmer-Bowlus para diferentes tipos de diámetro de tubería comercial de alcantarillado.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir la geometría y calibrar el modelo numérico tridimensional en función del modelo físico realizado en el laboratorio de hidráulica en el año 2010.

- Ejecutar un análisis de sensibilidad de los parámetros que intervienen en la hidrodinámica mediante la simulación numérica.

- Modelar los escenarios del aforador Palmer-Bowlus para cuatro diámetros comerciales de tubería de alcantarillado, obteniendo las curvas de descarga para cada aforador Palmer-Bowlus.

CAPÍTULO 2.

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1 BASE TEÓRICA

2.1.1 MEDIDORES DE CAUDALES

Según (Chow, 2004) en una sección critica de control, la relación entre la profundidad y el caudal es definitiva, no depende de la rugosidad del canal y de otras circunstancias no controlables, es decir la relación nivel versus caudal definida es la base teórica para la medición en canales abiertos.

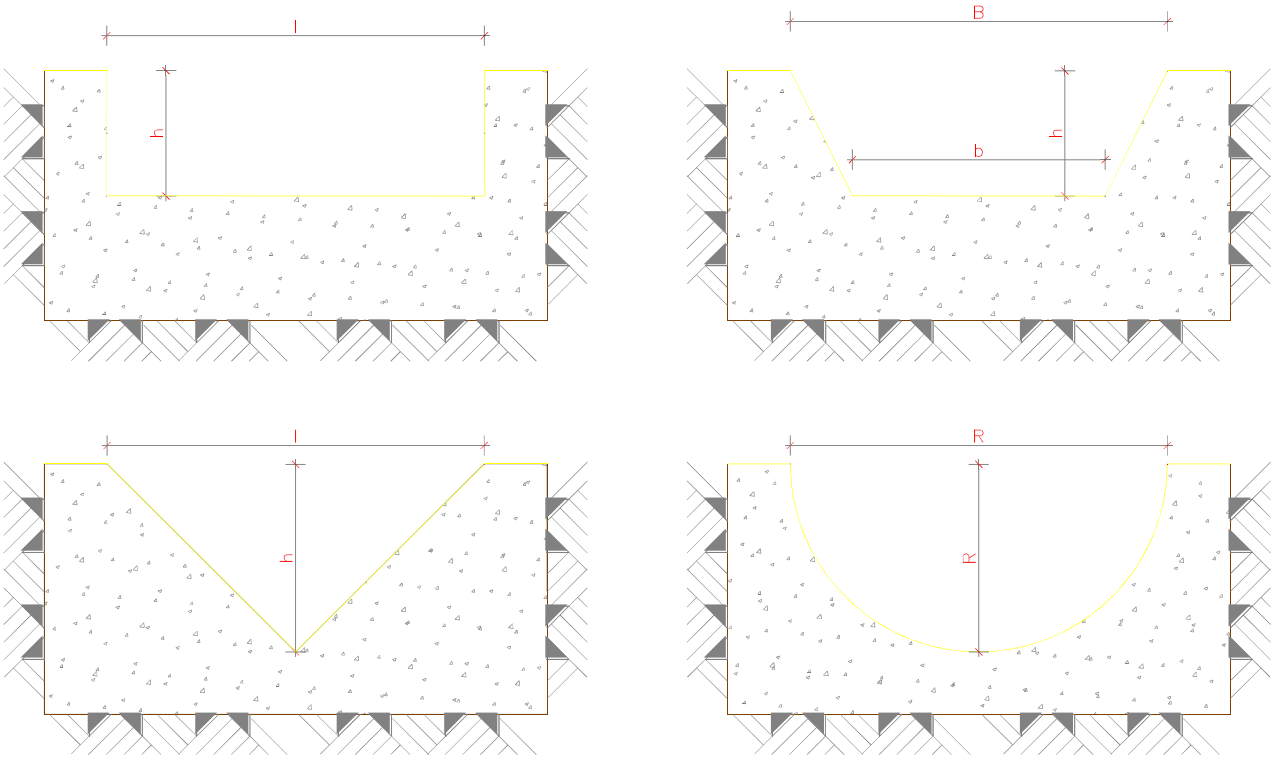
Por eso a través del tiempo se han desarrollado varias estructuras para la medición del flujo, donde se obtiene la profundidad crítica con la ayuda de la construcción de una elevación que generalmente es pequeña en la solera del canal.

En este campo se distinguen los vertederos por ser de fácil construcción, sin embargo, generan pérdidas considerables, otra desventaja de los vertederos es que al cerrar completamente el canal producen un embalsamiento aguas arriba de la estructura, si a esto le sumamos la presencia de partículas, están se irán depositando en el embalse cambiando paulatinamente el coeficiente de descarga del vertedero.

Los vertederos pueden ser de varias formas definidas por la sección mojada sobre la barrera y por la forma de esta, por lo que se tienen vertederos rectangulares, trapeciales, triangulares, de pared delgada, de pared gruesa, de forma redondeada, etc. (Domínguez, 1999)

Se presenta a continuación las figuras de algunos tipos de vertederos, para referencia.

FIGURA 2.1 VERTEDERO RECTANGULAR, VERTEDERO TRAPECIAL, VERTEDERO TRIANGULAR, VERTEDERO REDONDEADO.



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

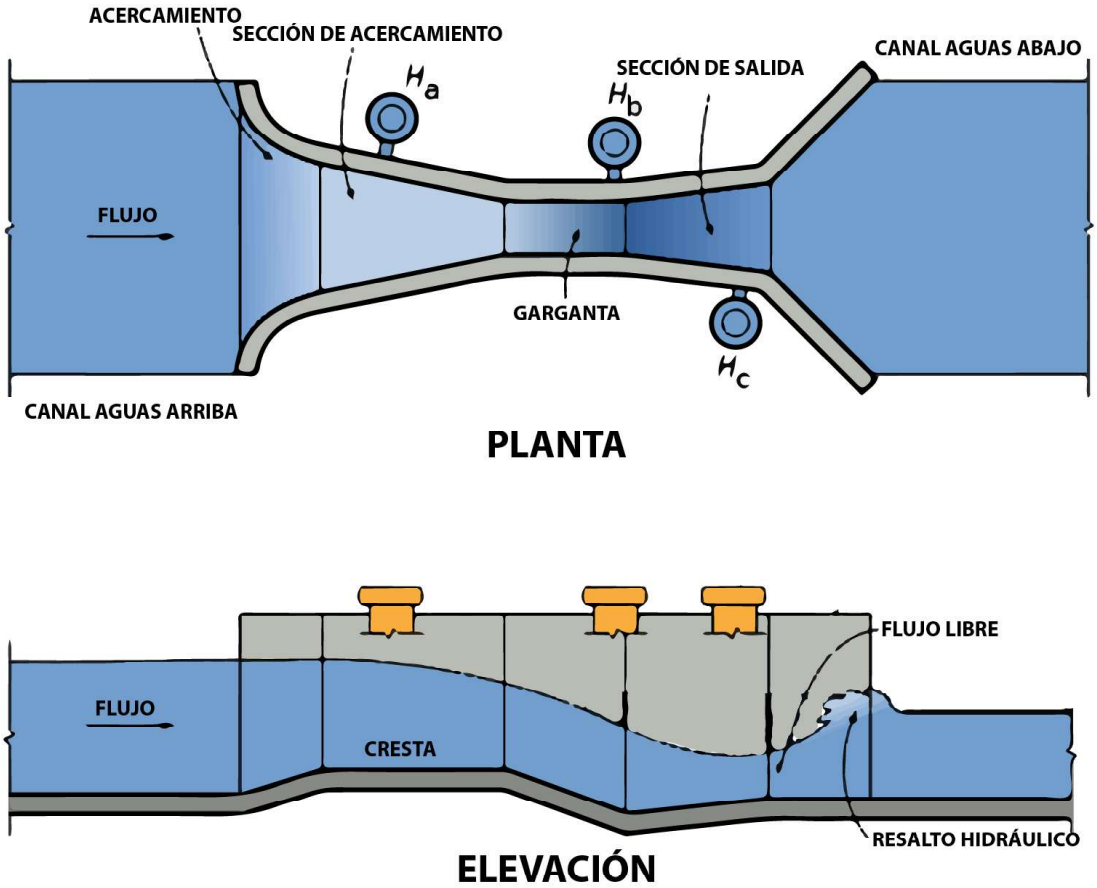
Para solventar este problema al menos parcialmente se popularizo el uso de medidores de flujo crítico (Chow, 2004), o como comúnmente se lo conoce medidor tipo Venturi, este usualmente opera en condición no sumergida, se produce la profundidad crítica en la sección contraída y un resalto hidráulico en la sección de salida.

Otra estructura más utilizada es el medidor tipo Parshall, debido a la contracción en la garganta, la velocidad del flujo es mayor a través del medidor tipo Parshall, lo que imposibilita que las partículas se sedimenten en el mismo, es decir cualquier partícula de arena o de limo puede ser arrastrada fuera de la estructura, sin embargo si existe una carga considerable de materiales, el medidor padecerá de los mismos inconvenientes de los vertederos, debido a la sedimentación sus resultados no serán confiables, para solventar este problema se inventó el medidor San Dimas, que tiene

un mecanismo auto limpiante para flujos altamente cargados de materiales, sin embargo estas estructuras tienen algunas desventajas entre estas tenemos, que no pueden usarse combinada con una compuerta aguas arriba, debido a su geometría la construcción es más costosa y obviamente requiere una mano de obra más especializada que los otros medidores como son los vertederos.

Se presenta a continuación el medidor Venturi:

FIGURA 2.2 MEDIDOR TIPO VENTURI.



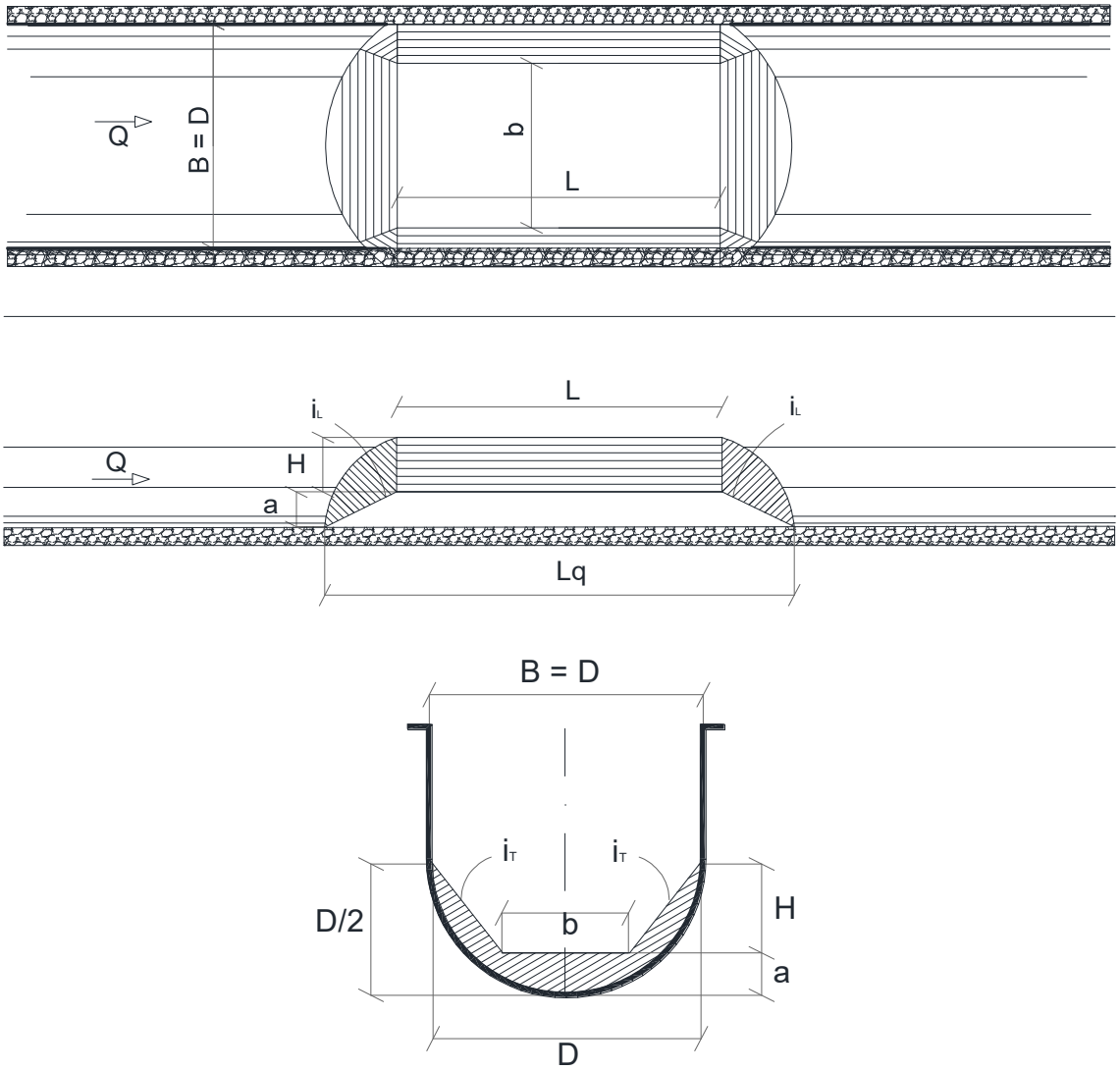
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

En respuesta de esto nació el medidor Palmer-Bowlus desarrollado en 1936, tomando como base el medidor tipo Venturi, la diferencia entre éste y el medidor Venturi es que el medidor tipo Palmer-Bowlus no requiere de la caída en el perfil longitudinal, por lo

que puede ser instalado en alcantarillados existentes donde no haya como modificar la solera del alcantarillado (Ludwig & Ludwig, 1951).

Se presenta a continuación la geometría del medidor Palmer-Bowlus:

FIGURA 2.3 MEDIDOR TIPO PALMER-BOWLUS.



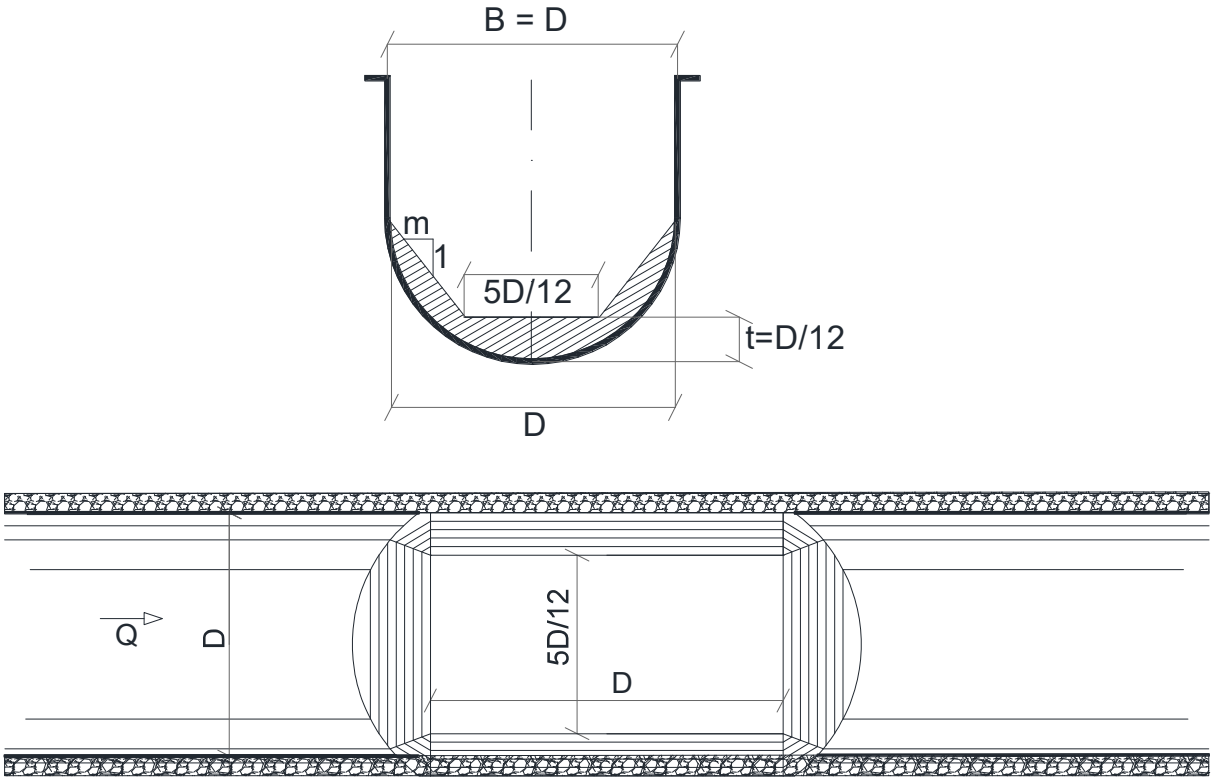
FUENTE: Torres & Vásquez, 2010

2.1.2 DISEÑO DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS

2.1.2.1 MÉTODO DE LUDWID & LUDWID

Según (Ludwig & Ludwig, 1951) los factores que determinan la aplicabilidad del medidor Palmer-Bowlus son el calado y la velocidad del flujo. La geometría es definida por las siguientes dimensiones:

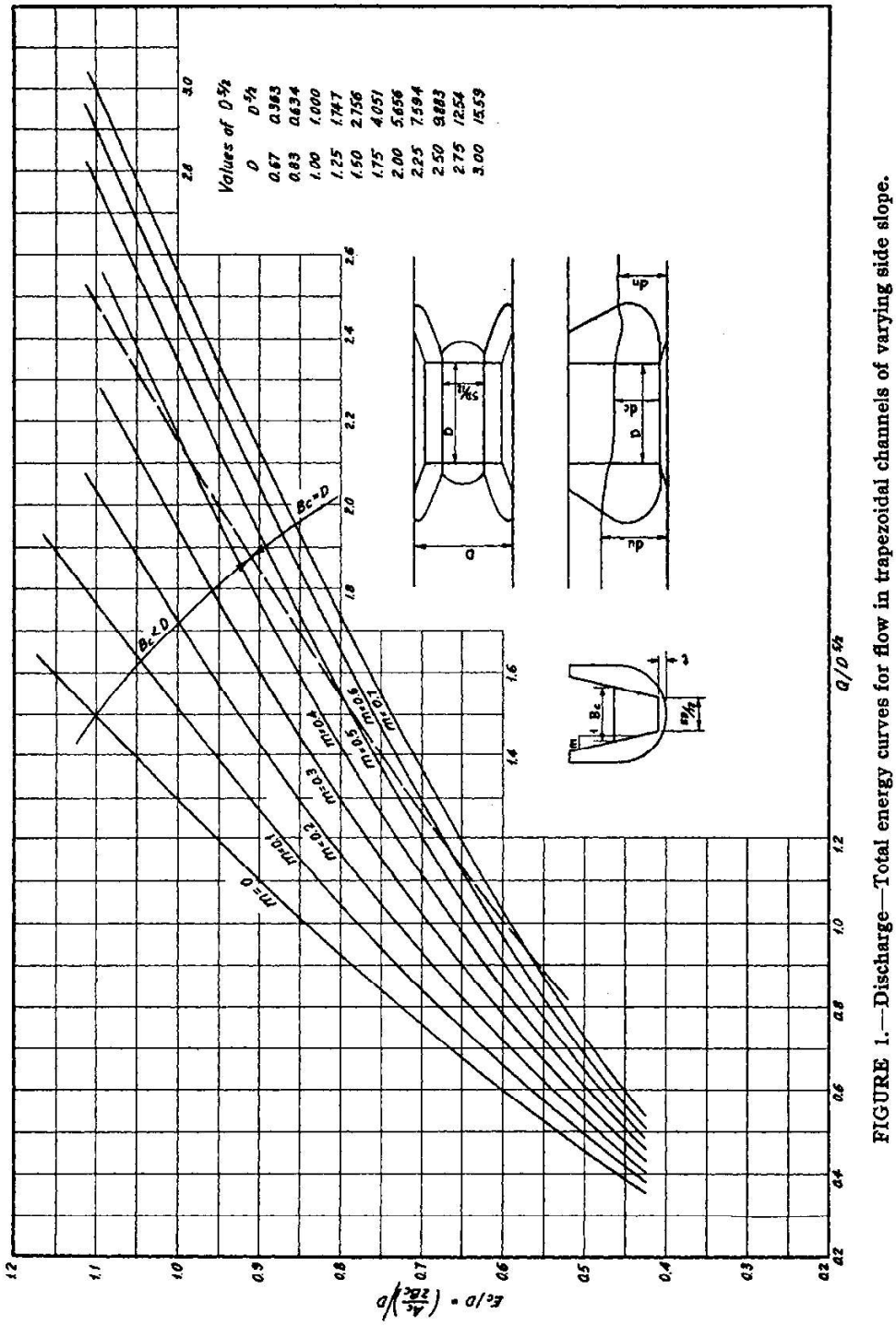
FIGURA 2.4 DIMENSIONES DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS SEGÚN (LUDWIG & LUDWIG, 1951).



FUENTE: LUDWIG & LUDWIG, 1951
ELABORACIÓN: Silva Roberto 2019

El objetivo del cálculo según los autores es encontrar la pendiente m, conociendo la velocidad y el caudal, basados en el uso del siguiente ábaco.

FIGURA 2.5 ÁBACO PARA EL CALCULO DE M (PENDIENTE) PARA EL MEDIDOR PALMER -BOWLUS



FUENTE: LUDWIG & LUDWIG, 1951

La curva de descarga se obtiene una vez conocida la pendiente m, se impone el calado d_c y se calcula:

$$\boldsymbol{B = \frac{5}{12} D\ (ft)}\ \textbf{(EQ. 3)}$$

$$\boldsymbol{B_c = B + (2 \times m \times d_c)\ (ft)}\ \textbf{(EQ. 4)}$$

$$\mathbf{A_C = d_c(B + m \times d_c)}\ \boldsymbol{(ft^2)}\ \textbf{(EQ. 5)}$$

$$\mathbf{h_{vc} = \frac{A_c}{2 \times B_c}}\ \boldsymbol{(ft)}\ \textbf{(EQ. 6)}$$

$$\mathbf{V_c = \sqrt[2]{\frac{A_c \times g}{B_c}}}\ \left(\frac{ft}{s}\right)\ \textbf{(EQ. 7)}$$

$$\mathbf{Q_c = A_c \times V_c}\left(\frac{ft^3}{s}\right)\textbf{(EQ. 8)}$$

$$\boldsymbol{E_c = d_c + h_{vc}\ (ft)}\ \textbf{(EQ. 9)}$$

Después se calculará el valor de V_u, utilizando el ábaco presentado en la Figura 2.6 donde $\frac{Q}{D^{\frac{5}{2}}}$ corresponde a las abscisas y $\frac{E}{D}$ corresponde a las ordenadas, $Q = Q_c\ y\ E = E_c + t$ o por ensayo y error utilizando la siguiente igualdad.

$$\boldsymbol{d_u + \frac{{V_u}^2}{2g} = E_c + t}\ \textbf{(EQ. 10)}$$

El impedimento de usar este procedimiento, es que la geometría deberá seguir los parámetros marcados aquí, si se cambia un parámetro las ecuaciones no serán válidas, y por lo tanto no se puede utilizar las mismas para la generalidad de medidores Palmer-Bowlus.

FIGURA 2.6 ÁBACO PARA EL CALCULO d_u

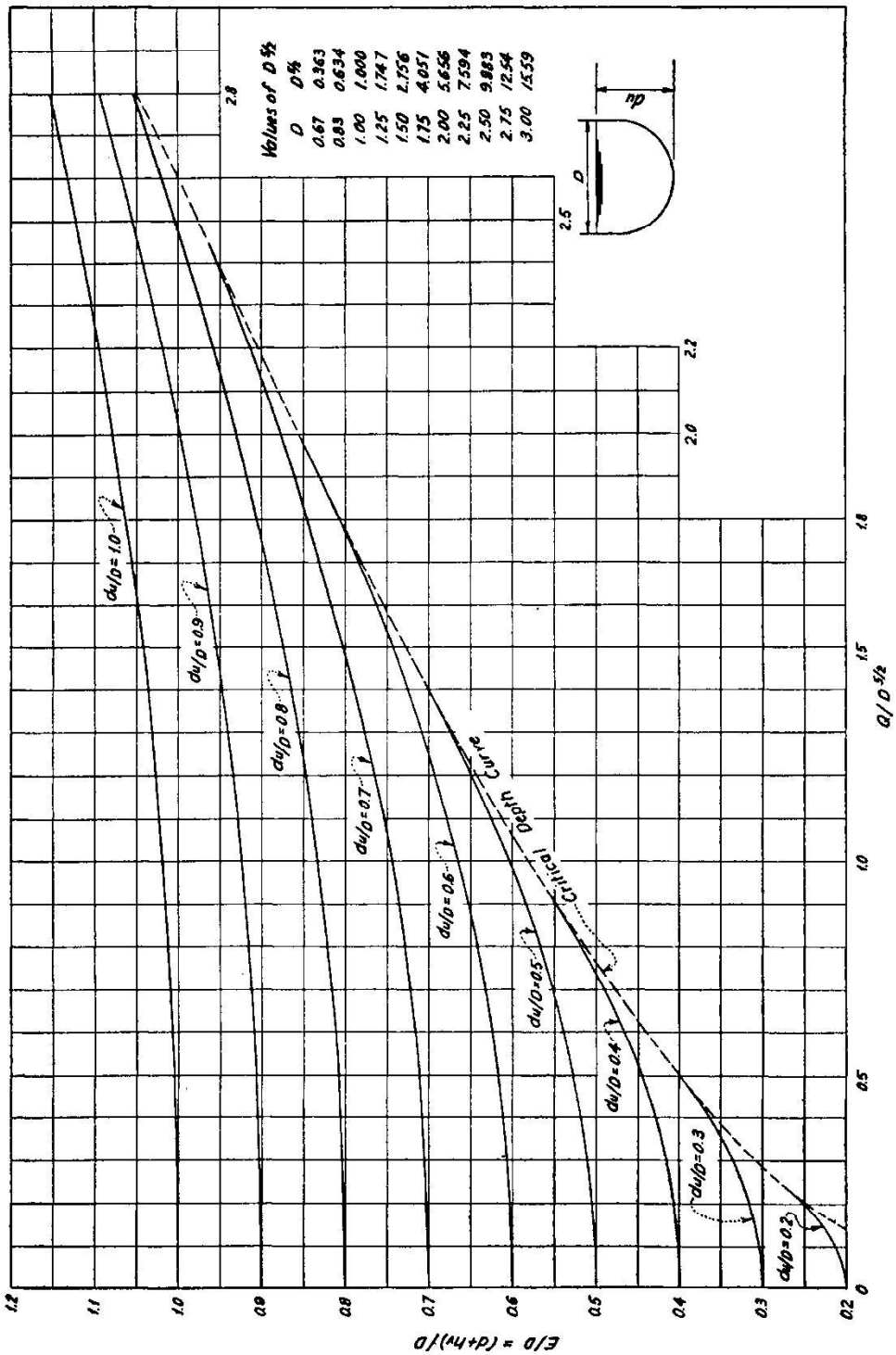


FIGURE 2.—Discharge—Total energy curves for flow in U-shaped channels.

FUENTE: LUDWIG & LUDWIG, 1951

2.1.2.2 FÓRMULA OBTENIDA POR (TORRES & VÁSQUEZ, 2010)

(Torres & Vásquez, 2010) partieron del mismo enfoque que (Ludwig & Ludwig, 1951), sin embargo, encontraron las ecuaciones para cálculo del caudal partiendo de la premisa que la geometría podía ser diferente, por lo que sus resultados pueden ser utilizados para encontrar los caudales para distintos tipos de medidor Palmer-Bowlus.

En este trabajo se encontró la siguiente ecuación basado en el análisis dimensional para cualquier medidor Palmer – Bowlus.

$$\boldsymbol{Q = h_0^{\frac{5}{2}} g^{\frac{1}{2}} f_1\left(\frac{D}{h_0}\right)} \textbf{ (EQ. 11)}$$

Dónde

h_0 es el calado en la zona de medición (m)

g es la gravedad igual a 9.81 $\left(\frac{m}{s^2}\right)$

$f_1\left(\frac{D}{h_0}\right)$ representa al coeficiente de descarga

Luego en el mismo trabajo y basados en los resultados experimentales obtuvieron el coeficiente de descarga según el siguiente procedimiento.

$$f\left(\frac{Q}{h_0^{\frac{5}{2}} g^{\frac{1}{2}}}, \frac{D}{h_0}\right) = 0$$

$$\boldsymbol{Cq = \left(\frac{Q}{h_0^{\frac{5}{2}} g^{\frac{1}{2}}}\right)} \textbf{ (EQ. 12)}$$

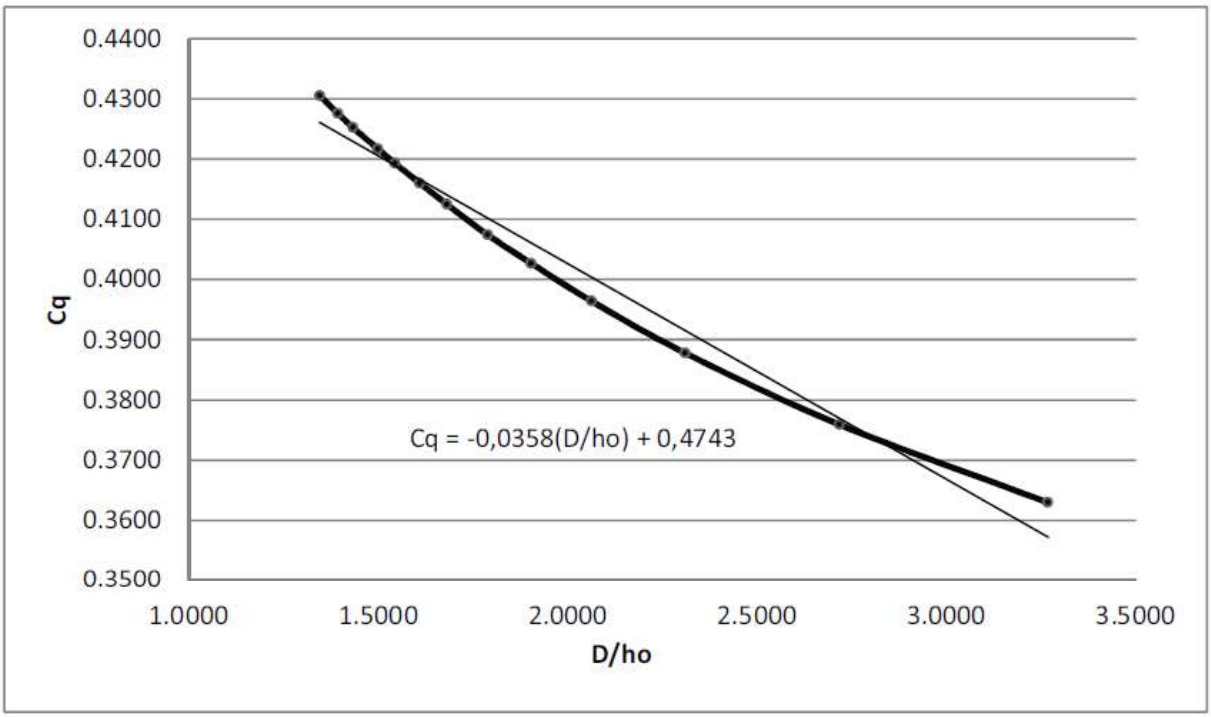
Por lo que con la ayuda de la siguiente tabla llegaron a calcular Cq

CUADRO 2.1 CALCULO DE LOS PARÁMETROS ADIMENSIONALES EN FUNCIÓN DE LOS DATOS TOMADOS EXPERIMENTALMENTE EN EL CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS 33 CM

Datos Teóricos		**Resultados del Análisis Dimensional**	
ho (m)	**Q (m^3/s)**	**Cq**	**Q (m^3/s)**
0,0790	0,0010	0,3248	0,0018
0,1020	0,0030	0,3585	0,0037
0,1240	0,0060	0,3790	0,0064
0,1450	0,0100	0,3928	0,0099
0,1660	0,0140	0,4031	0,0142
0,1860	0,0190	0,4108	0,0192
0,2050	0,0250	0,4167	0,0248
0,2240	0,0320	0,4216	0,0314
0,2340	0,0350	0,4238	0,0352
0,2430	0,0390	0,4257	0,0388
0,2640	0,0480	0,4296	0,0482
0,2840	0,0570	0,4327	0,0583
0,3050	0,0670	0,4356	0,0701

FUENTE: (Torres & Vásquez, 2010)

GRAFICA DE LA RELACIÓN FUNCIONAL RESTRINGIDA CQ VS $\frac{D}{H_0}$



FUENTE: (Torres & Vásquez, 2010)

Como resultado de su estudio se obtuvo la siguiente ecuación que sirve para cualquier aforador Palmer-Bowlus.

$$\frac{Q}{h_0^{\frac{5}{2}} g^{\frac{1}{2}}} = -0.0358\left(\frac{D}{h_0}\right) + 0.4743 \quad \textbf{(EQ. 13)}$$

En el presente trabajo, el modelo físico realizado en el laboratorio posee una geometría diferente a la propuesta por (Ludwig & Ludwig, 1951) por lo que se utilizará las ecuaciones planteadas por (Torres & Vásquez, 2010)

2.2 MODELACIÓN HIDRÁULICA (CFD)

Las técnicas numéricas en Ingeniería han experimentado un gran desarrollo en las últimas décadas, siendo concretamente la Mecánica de Fluidos una de las disciplinas científicas donde este auge ha tenido mayor repercusión (Fernández, 2012). El campo de la hidráulica y del diseño hidráulico ya ha incursionado en las simulaciones CFD, como una herramienta complementaria de los laboratorios de hidráulica, en donde los fenómenos son representados a escala, con un costo elevado. El análisis CFD ayuda a la toma de decisiones, y en gran medida a la reducción de costos en etapas de diseño y verificación (Aulestia, 2017), el costo variable de un experimento, en términos del alquiler del laboratorio, y o los costos de los salarios, es proporcional al número de puntos de datos y al número de configuraciones que van a ser probadas en un modelo físico, a diferencia de la modelación CFD que puede producir volúmenes extremadamente grandes de resultados a un costo virtualmente igual y permite también realizar estudios de rendimiento paramétrico (Versteeg & Malalasekera, 1995), por lo que la optimización de las estructuras hidráulicas debe ser tal que sus resultados sean confiables y los tiempos en los que se obtengan estos sean razonables.

En el campo de la dinámica de fluidos computacional ha existido un gran avance en la resolución de las ecuaciones complejas que gobiernan a los fluidos mediante el uso de modelos numéricos que pueden, con cierto grado de aproximación, entregar resultados confiables del funcionamiento hidráulico de las estructuras complejas analizadas (Aulestia, 2017). En la actualidad se aplica el estudio de los problemas hidráulicos a través de CFD que mediante la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes entregan resultados confiables.

2.2.1 MODELO FLOW-3D Y SU FUNCIONAMIENTO

2.2.1.1 MODELO FLOW-3D

Como se explicó en el apartado 2.1.3 mediante el uso de técnicas numéricas se puede resolver las ecuaciones complejas de Navier – Stokes, sin embargo, la capacidad de los ordenadores era muy leve hasta mediados del siglo XX, en este periodo debido al avance de procesamiento en los computadores se impulsó las técnicas CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS), es aquí donde se constituye el laboratorio

nacional de los Álamos (LANL) y en el año de 1985 comienza la comercialización del programa FLOW-3D, para la modelación de flujos con superficie libre.

El programa resuelve las ecuaciones promediadas de Reynolds – Navier Stokes (RANS) al igual que los algoritmos FAVOR y VOF para el contorno sólido y el seguimiento de la superficie libre.

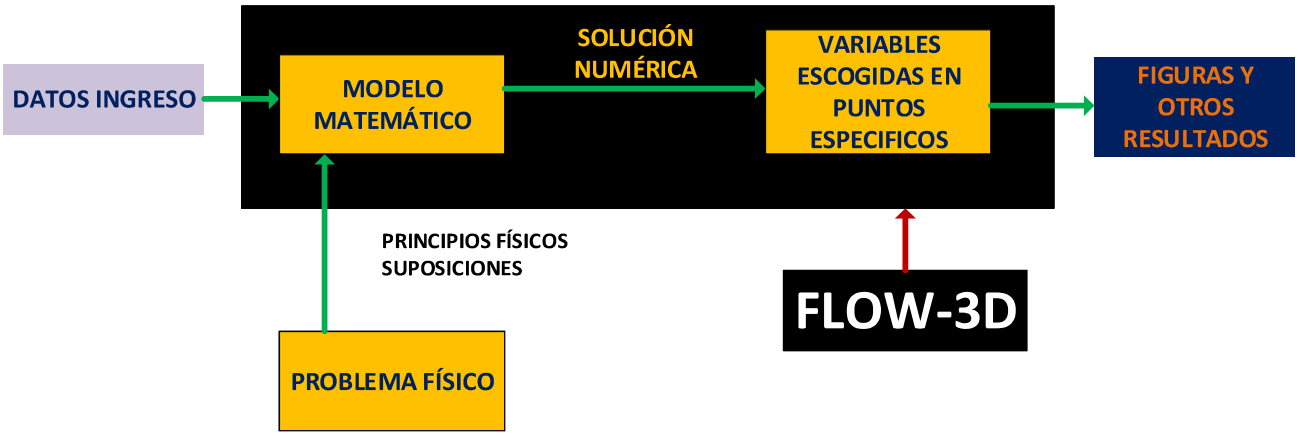
Este programa emplea el método de diferencias finitas para llegar a la solución, la presión está integrada en la ecuación de momento y la velocidad se la encuentra en la ecuación de continuidad, por lo que de esta manera se resuelven en forma iterativa todas las ecuaciones descritas anteriormente.

Para realizar esto el programa cuenta con tres estados que son:

1. Pre proceso
2. Solucionador
3. Post proceso

Esto se puede apreciar en el siguiente cuadro

FIGURA 2.7 DIAGRAMA DE FLUJO DEL FUNCIONAMIENTO DEL FLOW-3D



FUENTE: Silva Roberto, 2019

En el diagrama presentado se puede observar que el pre proceso está abarcando los datos de ingreso y el planteamiento del problema físico (primera etapa), en la segunda etapa tenemos que mediante el modelo matemático escogido, se efectúa la solución

numérica etapa es llamado solucionador, y para finalizar tenemos la tercera etapa que corresponde al post proceso que será la entrega de los resultados que corresponden a variables escogidas en puntos específicos (estas variables y estos puntos fueron seleccionados en la primera etapa es decir en el pre proceso) usualmente estos resultados son entregados por medio de figuras o tablas numéricas.

Para simplificar lo expuesto anteriormente se presenta el siguiente cuadro.

CUADRO 2.2 ESTRUCTURA DEL PROGRAMA FLOW-3D

PRE PROCESO	SOLUCIONADOR	POST PROCESO
Crear la geometría. Generar el mallado en toda la geometría. Identificar claramente el fenómeno físico a simular y las propiedades del fluido. Establecer las condiciones iniciales y la condición de borde compatible para la simulación numérica.	Ejecutar la simulación y esperar que el programa resuelva de forma iterativa las ecuaciones que definen el fenómeno físico. Dependiendo de los modelos a resolver, del tamaño del mallado y de los ordenadores empleados para la simulación, estas pueden durar desde minutos hasta semanas (o meses) de cálculos en tiempo real.	Analizar los resultados entregados por el programa Flow-3D en forma de: Textos, gráficos de las variables del fluido en una dimensión, dos dimensiones y tres dimensiones, ploteado de vectores, animaciones, etc.

FUENTE: Fernández Oro, 2012. Técnicas Numéricas en Ingeniería de Fluidos: Introducción a la Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD) por el método de volúmenes finitos. Barcelona: Reverté.

2.2.1.2 ECUACIONES FUNDAMENTALES

2.2.1.2.1 SISTEMA DE COORDENADAS

Las ecuaciones diferenciales a ser resueltas por el programa FLOW-3D están escritas en términos de coordenadas cartesianas (x, y, z), también acepta el uso de coordenadas radiales, pero al ser el presente proyecto realizado en coordenadas cartesianas se omitirá las ecuaciones en coordenadas radiales.

Las ecuaciones están formuladas con funciones de representación en celdas de área y volumen. Esta formulación usada por FLOW-3D es llamada FAVOR™ (Fraction Area/Volume Obstacle Representation Method), este método es usado para modelar regiones con geometrías complejas.

2.2.1.2.2 ECUACIÓN DE LA CONTINUIDAD DE MASA

La ecuación general de continuidad de masa se describe a continuación:

$$\boldsymbol{V_F \frac{\delta p}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x}(\rho u A_x) + R\frac{\delta}{\delta y}(\rho v A_y) + \frac{\delta}{\delta z}(\rho \omega A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR}} \quad \textbf{(EQ. 14)}$$

Dónde:

V_F: es la fracción de volumen abierto para flujo

ρ: es la densidad del fluido

R_{DIF}: término de la difusión turbulenta

R_{SOR}: fuente de masa

Al usar el sistema de coordenadas cartesianas los términos R = 1, ξ = 0.

Los componentes de velocidad u, v, w se encuentran en la dirección de las coordenadas x, y, z, La fracción de área abierta para el flujo en la dirección x, y, z se representa mediante A_x, A_y, A_z.

R_{DIF} que corresponde a la difusión turbulenta se define como:

$$\boldsymbol{R_{DIF} = \frac{\delta}{\delta x}\left(v_p A_x \frac{\delta \rho}{\delta x}\right) + \frac{\delta}{\delta y}\left(v_p A_y \frac{\delta \rho}{\delta y}\right) + \frac{\delta}{\delta z}\left(v_p A_z \frac{\delta \rho}{\delta z}\right)} \textbf{ (EQ. 15)}$$

El coeficiente $v_p = \frac{S_c \mu}{\rho}$, siendo μ el coeficiente de difusión de momento (viscosidad)

S_c es la constante que corresponde al número de Schmidt.

El termino R_{SOR} en el caso de fluidos incompresibles (agua) donde ρ es constante es igual a:

$$\boldsymbol{\frac{\delta}{\delta x}(uA_x) + \frac{\delta}{\delta y}(uA_y) + \frac{\delta}{\delta z}(uA_z) = \frac{R_{SOR}}{\rho}} \textbf{ (EQ. 16)}$$

2.2.1.2.3 ECUACIÓN DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO

Las ecuaciones de Navier – Stokes para las componentes de velocidad en las tres direcciones (u, v, w), se presentan a continuación:

$$\boldsymbol{\frac{\delta u}{dt} + \frac{1}{V_F}\left\{uA_x \frac{\delta u}{\delta x} + vA_y \frac{\delta u}{\delta y} + wA_z \frac{\delta u}{\delta z}\right\} = -\frac{1}{\rho}\frac{\delta \rho}{\delta x} + G_x + fx - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F}(u - \delta u_s)}$$

$$\boldsymbol{\frac{\delta v}{dt} + \frac{1}{V_F}\left\{uA_x \frac{\delta v}{\delta x} + vA_y \frac{\delta v}{\delta y} + wA_z \frac{\delta v}{\delta z}\right\} = -\frac{1}{\rho}\frac{\delta \rho}{\delta y} + G_y + fy - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F}(v - \delta v_s)}$$

(EQ. 17)

$$\boldsymbol{\frac{\delta w}{dt} + \frac{1}{V_F}\left\{uA_x \frac{\delta w}{\delta x} + vA_y \frac{\delta w}{\delta y} + wA_z \frac{\delta w}{\delta z}\right\} = -\frac{1}{\rho}\frac{\delta \rho}{\delta z} + G_z + fz - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F}(w - \delta w_s)}$$

Dónde:

G_x, G_y, G_z son las aceleraciones del cuerpo.

fx, fy, fz son las aceleraciones viscosas.

$u_s, v_s, w_s = U_s$ es la velocidad del fluido en la superficie del medio con respecto al medio mismo, y es calculado para cada volumen de control de la siguiente forma:

$$\boldsymbol{U_s = \frac{dQ}{\rho_Q dA} n} \quad \textit{(EQ. 18)}$$

Dónde:

dQ equivale al caudal másico.

$\boldsymbol{\rho_Q}$ densidad del medio fluido.

dA es el área de la superficie del medio en la celda.

n es la normal exterior a la superficie.

d es la constante que toma el valor de 0 cuando la presión es de estancamiento y 1 cuando la presión es estática.

2.2.1.2.4 ECUACIÓN DE LA ENERGÍA

La energía interna de un fluido se representa a continuación

$$\boldsymbol{V_F \frac{\delta}{\delta t}(\rho I) + \frac{\delta}{\delta x}(\rho I u A_x) + \frac{\delta}{\delta y}\left(\rho I v A_y\right) + \frac{\delta}{\delta z}(\rho I w A_z) = -p\left\{\frac{\delta u A_x}{\delta x} + \frac{\delta v A_y}{\delta y} + \frac{\delta w A_z}{\delta z}\right\}} \quad \textbf{(EQ. 19)}$$

Dónde:

I es la energía interna de la mezcla macroscópica.

Esta ecuación no contiene los términos que corresponden al cambio de coordenadas cilíndricas ni tampoco los términos de difusión termal o transferencia de calor.

2.2.1.2.5 SUPERFICIE LIBRE

La configuración del fluido está definida en términos de la función del Volumen del Fluido (VOF), $F(x, y, z, t)$, y satisface la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{\frac{\delta F}{\delta t} + \frac{1}{V_F}\left[\frac{\delta}{\delta x}(F A_x u) + \frac{\delta}{\delta y}\left(F A_y v\right) + \frac{\delta}{\delta z}(F A_z w)\right] = F_{DIF} + F_{SOR}} \quad \textbf{(EQ. 20)}$$

El término F_{SOR} corresponde a la densidad en el término R_{SOR}, de la ecuación de continuidad. Es la razón de cambio en el tiempo de la fracción de volumen del fluido, asociado con la fuente de masa del fluido.

El término F_{DIF} o coeficiente de difusión está definido por $vF = \frac{cF\mu}{\rho}$ dónde cF es una constante cuya reciproca se conoce como el número turbulento de Schmidt, sin embargo, este término será despreciado del presente estudio debido a que solo se toma en cuenta cuando existen dos fluidos.

2.2.1.3 MODELOS DE TURBULENCIA

Como concepto la turbulencia se expresa como un movimiento caótico no estable de los fluidos que ocurre cuando no existen suficientes fuerzas viscosas estabilizadoras, con Reynolds altos, las inestabilidades naturales que ocurren dentro del fluido no pueden ser minoradas y se manifiestan con la formación de remolinos de varios tamaños (Flow Science, Inc., 2016).

2.2.1.3.1 MODELOS DE TRANSPORTE DE TURBULENCIA

El modelo de transporte de turbulencia de una ecuación consiste en la ecuación de transporte para la energía cinética específica asociada con las fluctuaciones turbulentas de velocidad en el flujo conocida como la energía cinética turbulenta.

$$\boldsymbol{k_T = \frac{1}{2}\left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}\right)} \quad \textbf{(EQ. 21)}$$

Dónde las componentes u', v', w' son las componentes de la velocidad del fluido asociado con las fluctuaciones turbulentas caóticas.

$$\boldsymbol{\frac{\delta k_T}{\delta t} + \frac{1}{V_F}\left\{uA_x\frac{\delta k_T}{\delta x} + vA_y\frac{\delta k_T}{\delta y} + wA_z\frac{\delta k_T}{\delta z}\right\} = P_T + Diff_{k_T} - \varepsilon_T} \quad \textbf{(EQ. 22)}$$

El termino $Diff_{k_T}$ se denomina término de la difusión y está dada por

$$\boldsymbol{Diff_{k_T} = \frac{1}{V_F}\left\{\frac{\delta}{\delta x}\left(v_k A_x\frac{\delta k_T}{\delta x}\right) + \frac{\delta}{\delta y}\left(v_k A_y\frac{\delta k_T}{\delta y}\right) + \frac{\delta}{\delta z}\left(v_k A_z\frac{\delta k_T}{\delta z}\right)\right\}} \quad \textbf{(EQ. 23)}$$

Dónde $v_k$es el coeficiente de difusión de k_T y se calcula basado en el valor local de la viscosidad turbulenta.

En la actualidad se utiliza un modelo más sofisticado, consiste en el uso de dos ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta k_t y su disipación ε_T, este modelo lleva el nombre de modelo $k-\varepsilon$, este modelo encuentra buenas aproximaciones en varios tipos de flujo, se presenta a continuación la ecuación.

$$\frac{\delta\varepsilon_T}{\delta t}+\frac{1}{V_F}\left\{uA_x\frac{\delta\varepsilon_T}{\delta x}+vA_y\frac{\delta\varepsilon_T}{\delta y}+wA_z\frac{\delta\varepsilon_T}{\delta z}\right\}=\frac{1.44\varepsilon_T}{k_T}(P_T)+Diff_\varepsilon-1.92\frac{{\varepsilon_T}^2}{k_T}\ \textbf{(EQ. 24)}$$

El término difusión de la disipación se expresa como:

$$Diff_\varepsilon=\frac{1}{V_F}\left\{\frac{\delta}{\delta x}\left(v_\varepsilon A_x\frac{\delta\varepsilon_T}{\delta x}\right)+\frac{\delta}{\delta y}\left(v_\varepsilon A_y\frac{\delta\varepsilon_T}{\delta y}\right)+\frac{\delta}{\delta z}\left(v_\varepsilon A_z\frac{\delta\varepsilon_T}{\delta z}\right)\right\}\ \text{(EQ. 25)}$$

Otro modelo de turbulencia es el basado en el método del grupo de renormalización (RNG), este acercamiento aplica métodos estadísticos para la derivación del promedio de las ecuaciones, el modelo RNG usa ecuaciones similares a las del modelo $k-\varepsilon$, sin embargo las constantes encontradas empíricamente para el modelo $k-\varepsilon$, son derivadas explícitamente en el modelo RNG, en general el modelo describe de mejor manera flujos con intensidad de turbulencia bajos, las constantes del modelo son 1.42 en lugar de 1.44, la segunda constante se calcula de la energía cinética turbulenta (k_T) y la producción turbulenta (P_T).

En todos los modelos de transporte de turbulencia la viscosidad cinemática turbulenta es calculada mediante la siguiente ecuación.

$$v_T=A\frac{{k_T}^2}{\varepsilon_T}\ \textbf{(EQ. 26)}$$

A coeficiente en la evaluación de la viscosidad turbulenta con valor 0.09 para los modelos $k-\varepsilon$.

2.3 ACTUALIZACIONES DE LA VERSIÓN 11.2 DEL FLOW-3D

El programa Flow-3D tiene como objetivo agilizar aún más el proceso de simulación, incorporando la posibilidad de preparar simulaciones rápidas, evitando problemas comunas, identificando e introduciendo datos faltantes, y reportando información de simulación crítica por medio de su fuerte post procesamiento.

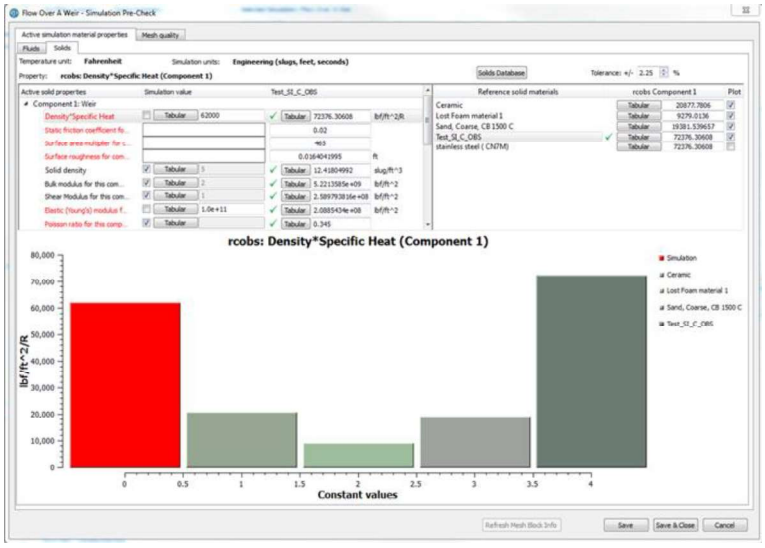
2.3.1 PRE CHEQUEO DE LA SIMULACIÓN

El principal objetivo de este nuevo pre chequeo es permitir al usuario conducir una comparación lado a lado de las propiedades de los materiales y de la calidad del mallado antes de correr la simulación.

2.3.1.1 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Un problema usual cuando se está realizando la simulación es la falta o la colación incorrecta de las propiedades de los materiales. Al comparar las propiedades de la simulación con las de los materiales de referencia seleccionados de la base de datos del FLOW-3D. Se le presenta al usuario la ventana de advertencia de que falta alguna propiedad o la propiedad introducida esta significativamente diferente a la encontrada en la base de datos.

FIGURA 2.8 EJEMPLO DEL PRE CHEQUEO Y ADVERTENCIA EN LOS MATERIALES

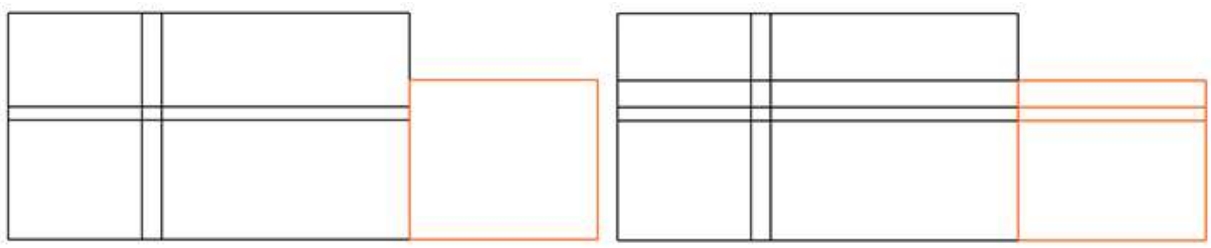


FUENTE: FLOW-3D, 2019

2.3.1.2 CALIDAD DEL MALLADO

Una de las fortalezas del FLOW-3D es la capacidad de crear rápidamente mallados en la geometría que podrían tomar horas o días en otros programas, con la herramienta de comprobación de la calidad del mallado que tiene como objetivo el comprobar automáticamente el mallado antes de realizar la simulación evitando errores críticos y ayudar al usuario a resolverlos, entre las características de esta herramienta se tiene la identificación de grandes cambios en el tamaño de la celda dentro de los diferentes bloques y entre bloques adyacentes, identificar errores entre bloques adyacentes estos pueden estar unidos, sobrepuestos o vinculados, o identificar e incorporar planos de mallado no existentes entre bloques de mallado adyacentes.

FIGURA 2.9 EJEMPLO DEL CHEQUEO EN LA CALIDAD DEL MALLADO



FUENTE: FLOW-3D, 2019

2.3.2 SOLUCIONADOR

2.3.2.1 SOLUCIONADOR DE SUB-DOMINIOS

El acercamiento de la locación de memoria no estructurada para solucionar configuraciones en mallados estructurados se ha extendido para tener espacios de memoria separados (sub - dominios), para las soluciones de flujo de fluidos, transferencia de calor en un sólido y flujo núcleo – gas. Una solución variable es guardada solamente en celdas donde se necesita, el resultado es una representación más compacta y eficiente de la solución en la memoria, menor tiempo de simulación y tamaños de archivos más pequeños. No existe la necesidad de introducir algo por parte del usuario para aprovechar esta ventaja, debido a que el programa genera estos

sub – dominios automáticamente basado en la geometría y el modelo seleccionado, con la salvedad que no existe perdida de exactitud en los resultados.

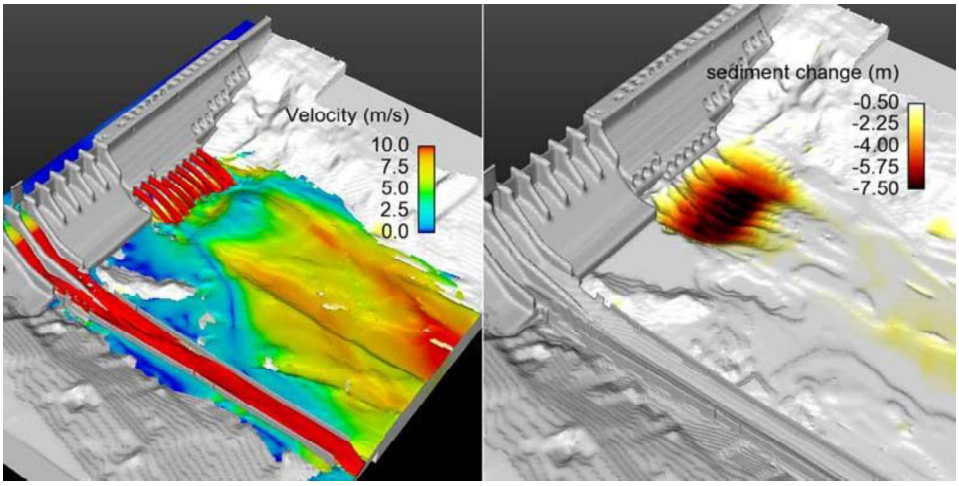
2.3.2.2 CONFORMACIÓN DE LOS BLOQUES DE MALLADO

En lugar de ser rectangulares, como usualmente el mallado es realizado, los bloques de mallado conformados tienen la forma de acuerdo a la geometría, existen dos tipos de conformación de bloque de mallado, el mallado de cavidades y el mallado de componente sólido. El mallado de cavidades es usado comúnmente en la modelación de simulaciones de fundición, dónde la cavidad generalmente requiere una mallado más fino que el molde.

2.3.2.3 MODELO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS Y EROSION

El modelo de transporte de sedimentos y erosión se a reescrito para que use las funciones FAVOR™ para describir la cama de sedimentos, mejorando la exactitud del esfuerzo cortante turbulento en la cama de sedimentos y mejorando la visualización de los resultados. La exactitud de la aproximación de la erosión y depósito de los sedimentos también ha sido mejorada con la inclusión de la rugosidad de la superficie basado en el diámetro d50. El modelo ha sido también extendido a los flujos de aguas superficiales (shallow water flows), permitiendo a los usuarios de estos modelos de grandes escalas resolver problemas de sedimentación.

FIGURA 2.10 EJEMPLO DE UN MODELO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS



FUENTE: FLOW-3D, 2019

2.3.3 POST-PROCESAMIENTO

Flow-3D ha creado FlowSight™ que es una nueva y avanzada herramienta de visualización, basada en el post procesador líder en la industria EnSight, por lo que este post procesador ofrece nuevas y poderosas maneras de analizar, visualizar y comunicar los resultados de la simulación.

Entre las capacidades tenemos:

- Analizar y comparar múltiples simulaciones.
- Renderización del volumen, que permite observar resultados internos que no pueden ser observados en las renderizaciones de planos.
- Muestra la interacción entre el fluido y la estructura incluidas la evolución de las solicitaciones térmicas con los resultados del fluido simultáneamente.
- Cortes interactivos 2D a través del fluido y la estructura.

2.4 ESTADO DEL ARTE

Como resultado de la investigación bibliográfica se concluyó que no existen trabajos anteriores sobre la obtención de las curvas de descarga de un medidor Palmer-Bowlus utilizando programas CFD sin embargo la presente tesis utilizó información base o de partida, por lo que se presenta a continuación la matriz del estado del arte del diseño del medidor Palmer-Bowlus como también modelación CFD.

CUADRO 2.3 ESTADO DEL ARTE EN EL DISEÑO DE MEDIDORES PALMER-BOWLUS Y MODELACIÓN CFD

Nº	TÍTULO	FECHA	FUENTE	AUTOR	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN
1	Design of Palmer-Bowlus flumes	1951	Sewage and Industrial Wastes VOL 23 NO 9	John H. Ludwig, Russell G. Ludwig	El documento contiene los lineamientos para el diseño del aforador Palmer-Bowlus, en este documento se tiene la descripción del aforador, los factores que controlan el diseño, los casos límites para el uso, la forma de la sección de control, la derivación de las fórmulas, la selección del tipo de garganta, etc.
2	Análisis de medidores de caudal para flujo subcrítico en sistemas de alcantarillado	2010	Escuela Politécnica Nacional	Torres, C., & Vásquez, E.	En este documento se presenta información relevante sobre el estudio del modelo físico del medidor Palmer-Bowlus como: dimensiones, parámetros hidráulicos y resultados. Los cuales servirán de base para el estudio, diseño y calibración del modelo numérico (CFD).
3	Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos.	2012	Editorial Reverté, S.A.	Fernández, J.	Este libro aborda los contenidos básicos de la dinámica de fluidos computacional en el mismo encontramos, introducción al CFD, algunas ideas fundamentales, ecuaciones diferenciales de conservación, método de volúmenes finitos (MVF), MVF en problemas difusivos puros, MVF en problemas difusivos convectivos, condiciones de contorno y términos fuente, métodos iterativos de resolución, modelización de la turbulencia, aplicación del CFD a flujos industriales (i-CFD)
4	Standard test method for Open-Channel flow measurement of water with Palmer-Bowlus Flumes D5390-93 (Reapproved 2013)	2013	ASTM	ASTM	El documento contiene los lineamientos para el diseño del aforador Palmer-Bowlus, en este documento se tiene el método de prueba para calcular el caudal de agua en alcantarillados y canales abiertos, configuraciones generales del canal de aforo Palmer-Bowlus, relaciones de descarga, coeficientes de forma cs, calibración, precisión.
5	Modelación numérica del flujo rasante en una rápida escalonada	2016	Escuela Politécnica Nacional	Casa, E.	En este documento se puede conocer la información base sobre la hidráulica y sus ecuaciones fundamentales; así como el funcionamiento del programa flow-3d.

Nº	TÍTULO	FECHA	FUENTE	AUTOR	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN
	aplicando la dinámica de fluidos computacional (CFD) Programa FLOW-3D. Quito.				
6	Flow-3D v11.2 Documentation	2016	Flow Science	Flow Science	Manual de usuario del programa flow-3d en el cual se detalla la base teórica con la que parte las diferentes modelaciones, el documento se divide en instalación y configuración, instalación, mantenimiento, configuración del software, uso del Flow 3d, que es lo nuevo en esta versión, tutorial / inicio rápido, configuración del modelo, resultados computacionales, post proceso, errores, información de referencia
7	Modelación numérica en tres dimensiones de flujo en las compuertas de la captación del Proyecto Toachi - Pilatón aplicando dinámica de fluidos computacional (CFD)	2017	Escuela Politécnica Nacional	Aulestia, C.	Transporte de sedimentos – base teórica o tipos de transporte de sedimentos o el agua como medio de transporte de sedimentos o efectos de la concentración de sedimentos o propiedades básicas de las partículas o velocidad terminal de sedimentación de una partícula o descripción de los principios del transporte de sedimentos.

FUENTE: INFORME PROYECTO PII-FICA-01-2018, 2018

En el Capítulo 2.1.2 se utilizó la información obtenida de (Ludwig & Ludwig, 1951) para explicar el procedimiento de diseño de un medidor Palmer-Bowlus de geometría definida y posteriormente la obtención de la curva de descarga teórica característica, el trabajo de (Torres & Vásquez, 2010) tiene como base el mismo enfoque explicado por (Ludwig & Ludwig, 1951) con la diferencia que partieron de la premisa que la

geometría del medidor Palmer-Bowlus puede ser diferente y como resultado de la investigación se obtuvo ecuación (EQ. 13), que puede ser utilizada para encontrar la curva de descarga teórico – experimental para distintos tipos de medidor Palmer-Bowlus.

Para el Capítulo 2.2 se utilizó la información obtenida de (Flow Science, Inc., 2016) como principal fuente bibliográfica, así como (Aulestia, 2017), y (Casa, 2016) debido a que ambos autores emplearon modelación CFD para resolver problemas puntuales, algunas conclusiones obtenidas en estos dos trabajos fueron tomadas en cuenta en el presente proyecto en el Capítulo 3.

CAPÍTULO 3.

METODOLOGÍA PARA LA MODELACIÓN EN TRES DIMENSIONES

3.1 DATOS GEOMÉTRICOS Y RESULTADOS OBTENIDOS EN EL MODELO FÍSICO.

En la Tesis realizada por (Torres & Vásquez, 2010) se construyó un medidor Palmer – Bowlus y en él se realizó la calibración y obtención de la curva de descarga experimental, de dicho estudio se concluyó que la curva de descarga teórica para el medidor Palmer-Bowlus responde a:

$$\boldsymbol{Q = \left(-0.0358\left(\frac{D}{h_0}\right) + 0.4743\right) g^{\frac{1}{2}}(h_0)^{\frac{5}{2}}} \quad \textbf{(EQ. 27)}$$

Dónde:

Q= caudal $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

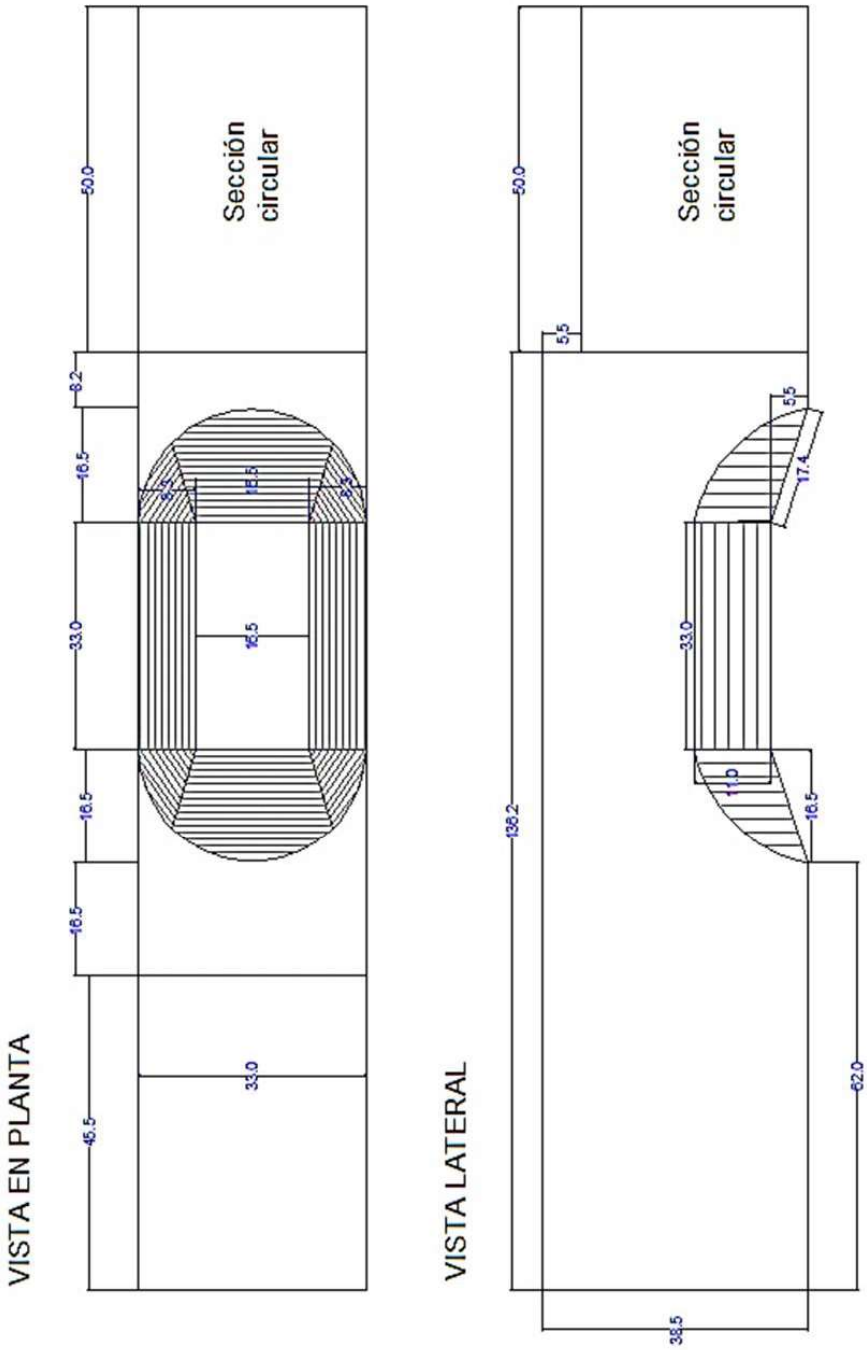
D= diámetro del aforador Palmer-Bowlus (m)

h_0= profundidad del agua en la ubicación determinada del aforador (m)

g= aceleración de la gravedad $\left(9.81\frac{m}{s^2}\right)$

Se construyo el modelo físico del canal Palmer-Bowlus con un diámetro de 33 cm según las siguientes medidas.

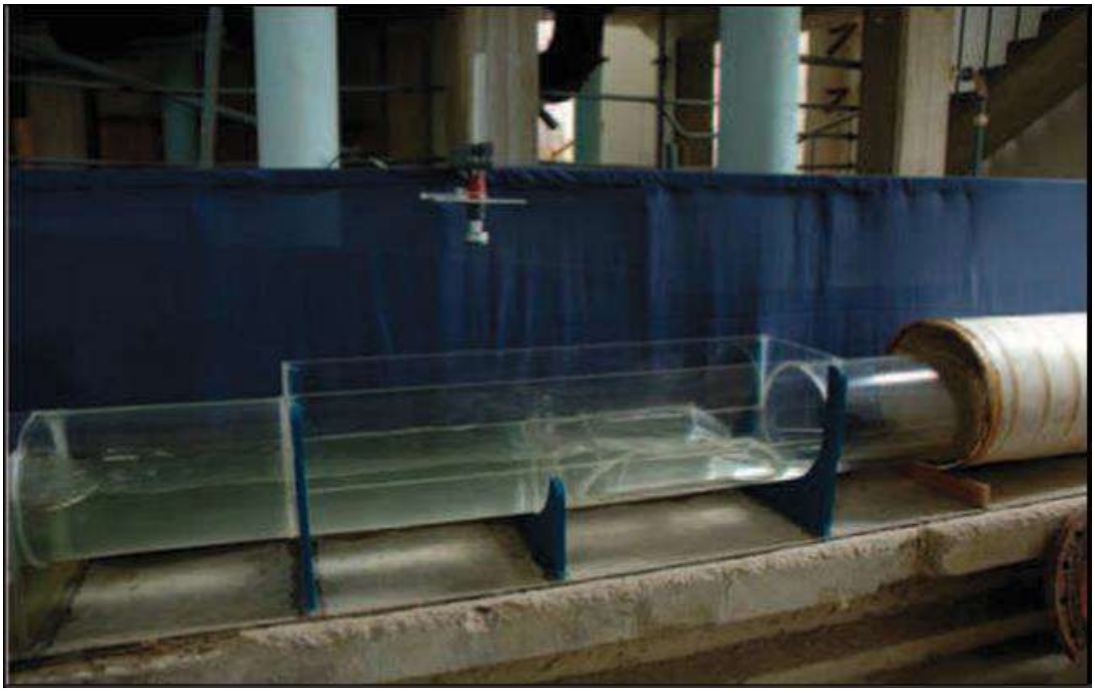
FIGURA 3.1 DIMENSIONES EN CM DEL MODELO FÍSICO: CANAL PALMER-BOWLUS, INSTALADO EN EL LABORATORIO DOCENTE DE HIDRÁULICA EN EL AÑO 2010.



FUENTE: (Torres & Vásquez, 2010)

Se presenta a continuación la fotografía del medidor Palmer-Bowlus de D=33 cm funcionando en el laboratorio.

FIGURA 3.2 MODELO CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS 33 CM



FUENTE: (Torres & Vásquez, 2010)

3.1.1 PARÁMETROS DE DISEÑO

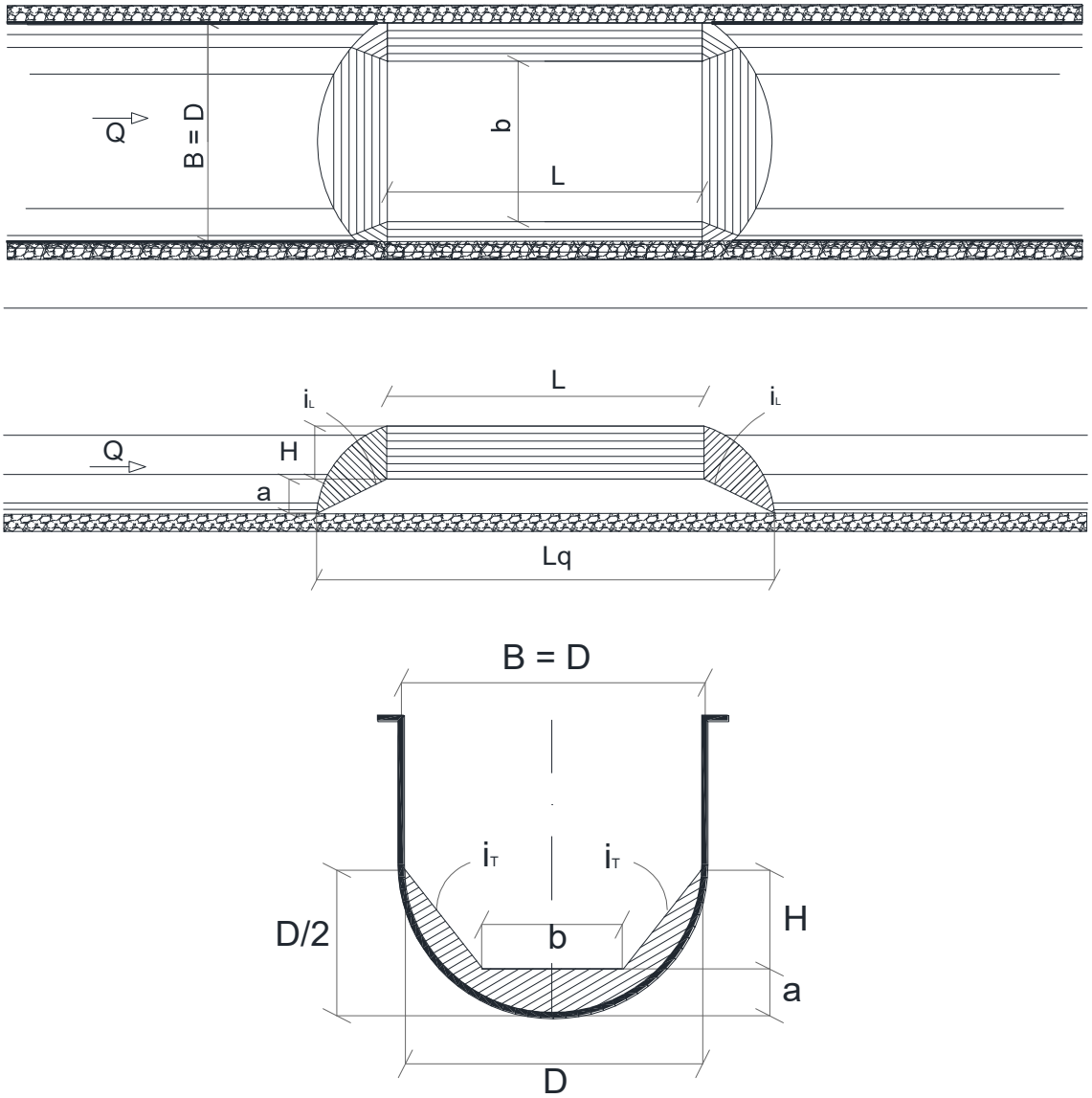
A continuación, estableceremos los parámetros a ser utilizados en la modelación por el programa FLOW-3D.

3.1.1.1 GENERACIÓN DE LA GEOMETRIA

La geometría del medidor de caudal Palmer Bowlus partió del estudio realizado en la tesis "Análisis de medidores de caudal para flujo subcrítico en sistemas de alcantarillado" (Torres & Vásquez, 2010), en la cual se especifican las dimensiones de este aforador.

A continuación, se presenta la ubicación de las dimensiones fundamentales para construir el medidor Palmer-Bowlus que será producto del presente estudio.

FIGURA 3.3 DIMENSIONES FUNDAMENTALES DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS



FUENTE: (Torres & Vásquez, 2010)

Para el caso en estudio se tiene que:

$$D = B = 33\ (cm)$$

$$a = \frac{D}{6} = 5.5\ (cm)$$

$$b = \frac{D}{2} = 16.5(cm)$$

$$i_t = 2:1\ (pendiente)$$

$$i_l = 1:3\ (pendiente)$$

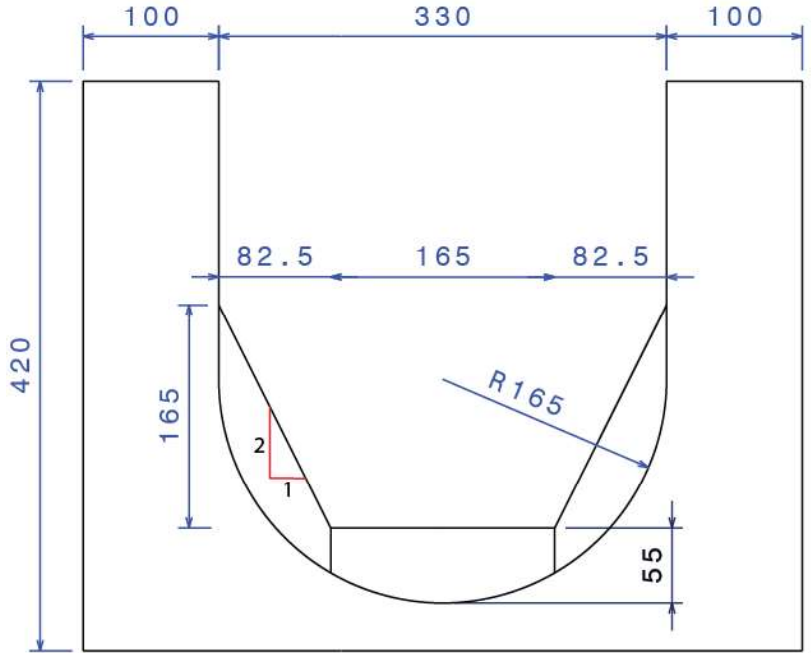
$$H = \frac{(B - b) \times i_t}{2} = 16.5\ (cm)$$

$$L = D = 33\ (cm)$$

$$L_q = L + \frac{2a}{i_l} = 66\ (cm)$$

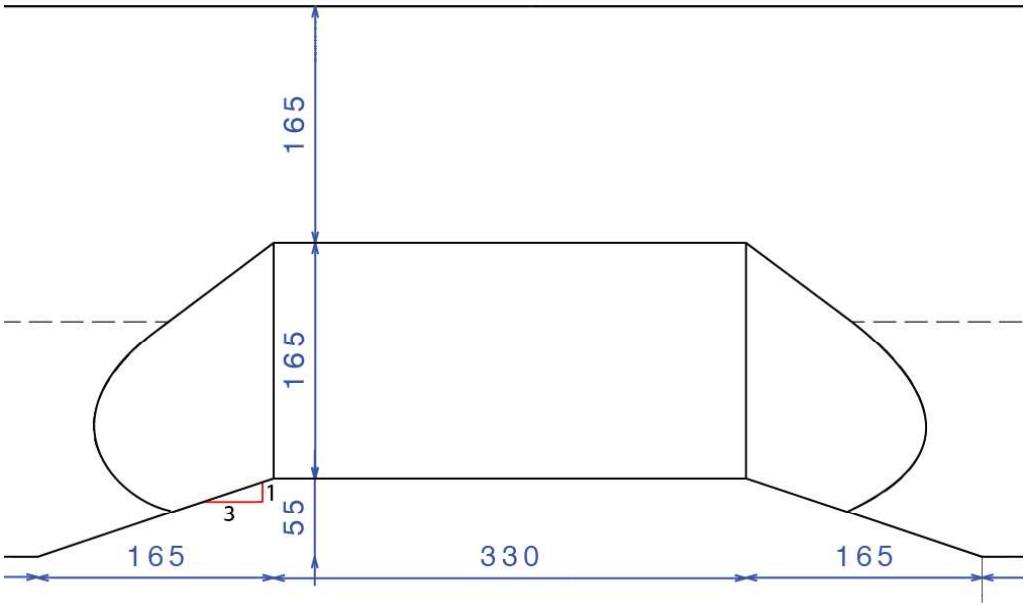
Con lo que se procedió a realizar la geometría del aforador de laboratorio.

FIGURA 3.4 DIMENSIONES DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS DE D=33 (CM) (CORTE)



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

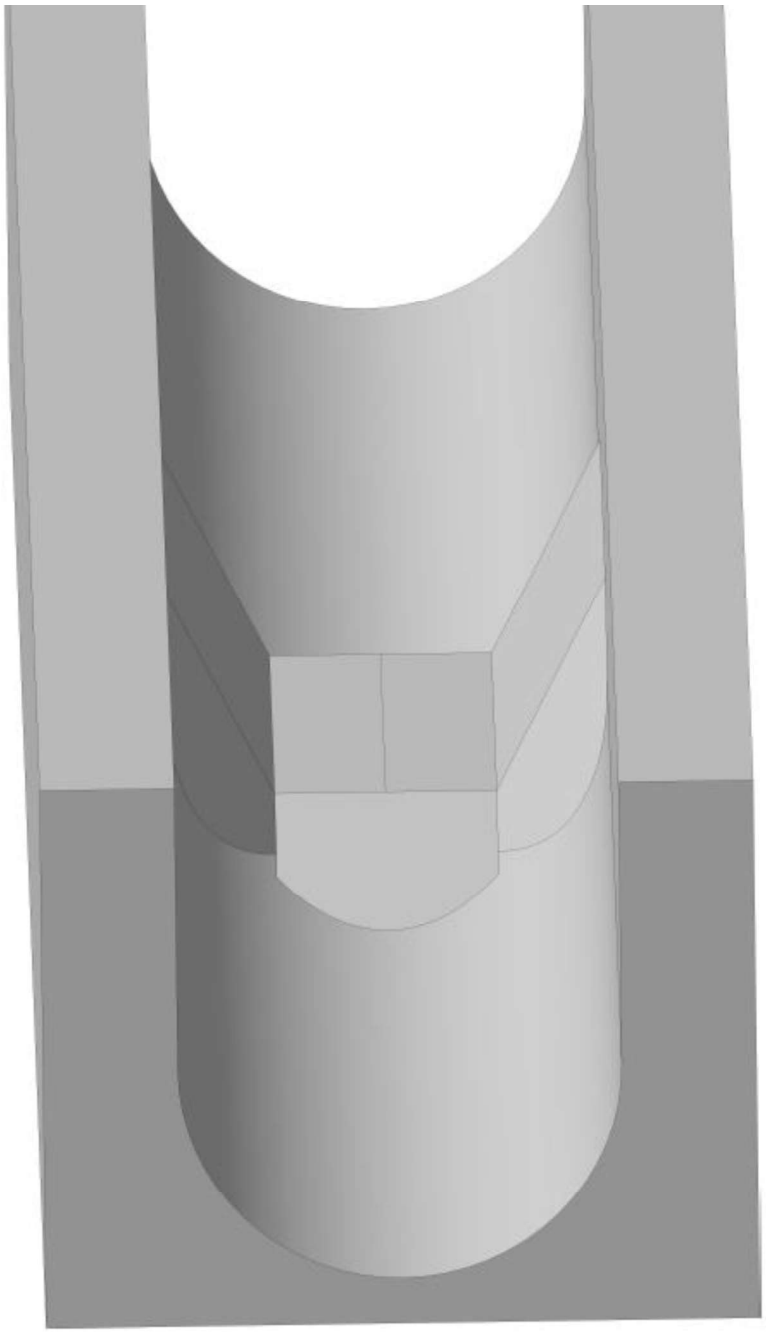
FIGURA 3.5 DIMENSIONES DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS DE D=33 (CM) (PERFIL)



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

Con esta información se realizó el modelo 3D del medidor y se presenta a continuación la renderización del mismo

FIGURA 3.6 RENDERIZACIÓN DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS DE D=33 (CM)



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

3.1.1.2 CREACIÓN DEL MALLADO

El programa Flow-3D posee la herramienta FAVOR™ para crear automáticamente el mallado del espacio a modelar. FLOW-3D utiliza una malla estructurada que puede definirse ya sea en un sistema cartesiano o cilíndrico de coordenadas. En la geometría el nombre que se designa a cada bloque de malla y se da de acuerdo a lo que se ingrese progresivamente en dirección del flujo.

Se debe considerar durante el mallado dos parámetros importantes para obtener resultados precisos y eficientes, según la recomendación del manual del usuario de FLOW-3D:

- La relación de tamaño entre celdas adyacentes o entre celdas de la misma dirección debe ser cercana a 1 y no superar el valor de 1.25.
- La relación de aspecto de las celdas o la relación del tamaño de celda máxima en una dirección con relación a las otras dos direcciones debe ser lo más cercano a 1 y no exceder el valor de 3.0.

La diferencia de tamaño de celdas entre bloques adyacentes o anidados, especialmente en la dirección perpendicular al contorno recomendado es de 2 a 1 para evitar la pérdida significativa de precisión interbloques.

Se debe evitar colocar límites interbloques en las zonas donde se esperan grandes gradientes de flujo, incluidas las zonas con importantes variaciones en la geometría. (Flow Science, Inc., 2016)

MALLADO BÁSICO O UNIFORME

Tiene un tamaño de celda constante en todas las direcciones. Un mallado uniforme puede ser creado de dos maneras: Editando un tamaño de celda constante o mediante la edición de un número total de celdas.

En algunos casos puede ser ventajoso estirar las celdas en una dirección particular. Para ello se añade planos de malla intermedios en puntos fijos especificando el tamaño o número de celdas para adaptar la separación de las líneas de la cuadrícula (Casa, 2016).

MALLADO MULTIBLOQUE CON BLOQUES DE MALLA ACOPLADOS, ANIDADOS, SOLAPADOS Y AJUSTABLES A LA GEOMETRÍA.

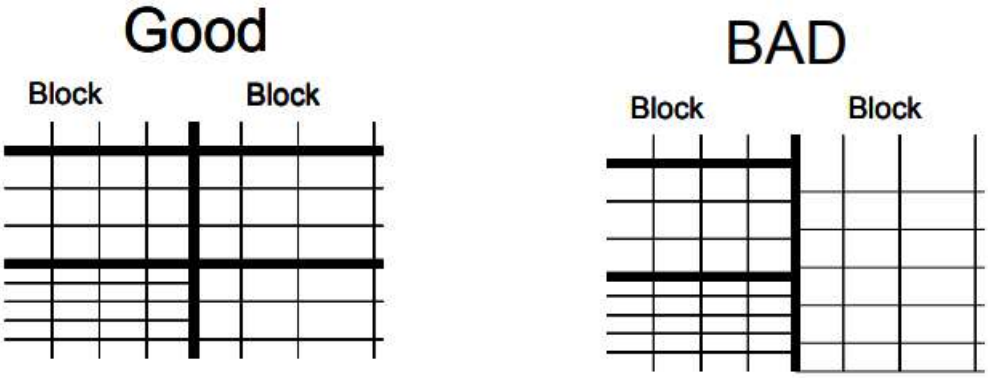
Los bloques de malla múltiple permiten un mallado eficiente en los casos en que no es posible generar una malla de tamaño razonable con un solo bloque de malla.

Pero también poseen las siguientes desventajas:

- Múltiples bloques de malla introducen inexactitud numérica.
- Los bloques de malla múltiple pueden introducir problemas de convergencia y, por lo tanto, aumentar el tiempo de solución. Si se usan descuidadamente múltiples bloques de malla, esta pérdida de rendimiento puede cancelar cualquier beneficio de rendimiento obtenido por la reducción de las celdas de cálculo que se logró con el uso de múltiples bloques de malla.

Por lo tanto, es recomendable utilizar varios bloques de malla solo cuando sea absolutamente necesario para mantener la cuenta regresiva de las celdas de malla. Si se utilizan varios bloques de malla, se debe tener mucho cuidado al alinear las líneas de la cuadrícula de los bloques de malla adyacentes.

FIGURA 3.7 EJEMPLOS DE MALLADO MULTIBLOQUE CORRECTO E INCORRECTO



FUENTE: (Flow Science, Inc., 2016)

MALLA ANIDADA

Es cuando un bloque de malla esta contenido o encerrada en otro bloque de malla. La solución de las ecuaciones se produce en el tamaño de celda más pequeño (Casa, 2016).

MALLA TRASLAPADA

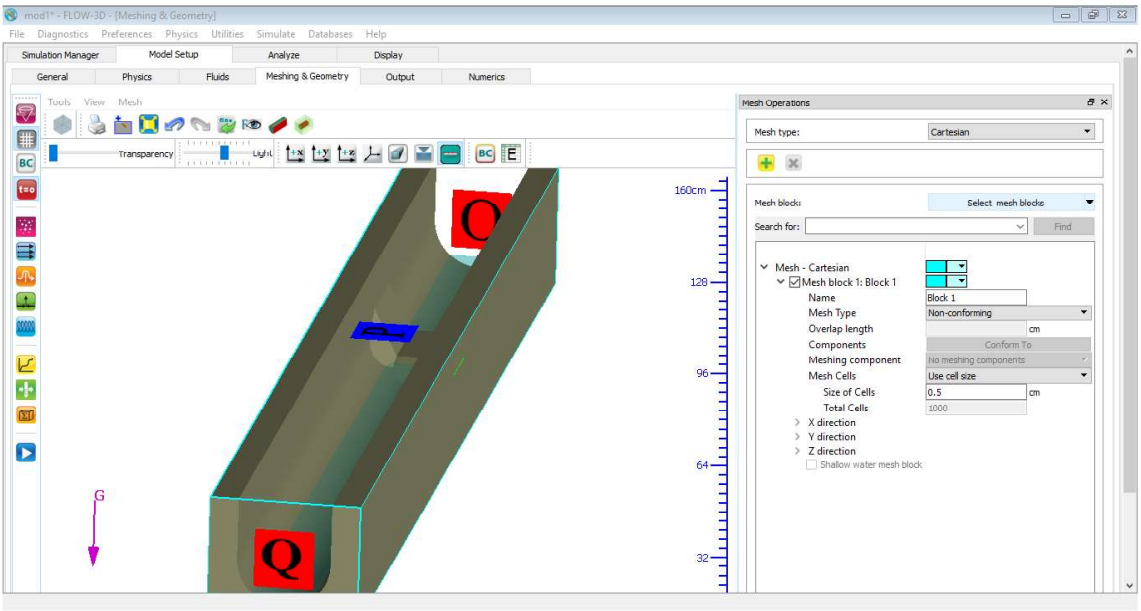
Es cuando dos bloques de malla se traslapan parcialmente entre sí. Las ecuaciones de movimiento son resueltas de forma predeterminada en el bloque de malla con un tamaño promedio de celda (Casa, 2016).

En el caso de estudio se utilizará una malla única es decir una malla básica, es decir uniforme, en capítulos posteriores se analizará el efecto del tamaño de malla en la modelación por lo que se expone a continuación la malla realizada.

Se partió como base que el tamaño de celda sea 0.5 (cm) en todas sus direcciones (uniforme) y debido a las características propias de la modelación se tiene un bloque de mallado, el tipo de malla escogido es cartesiano.

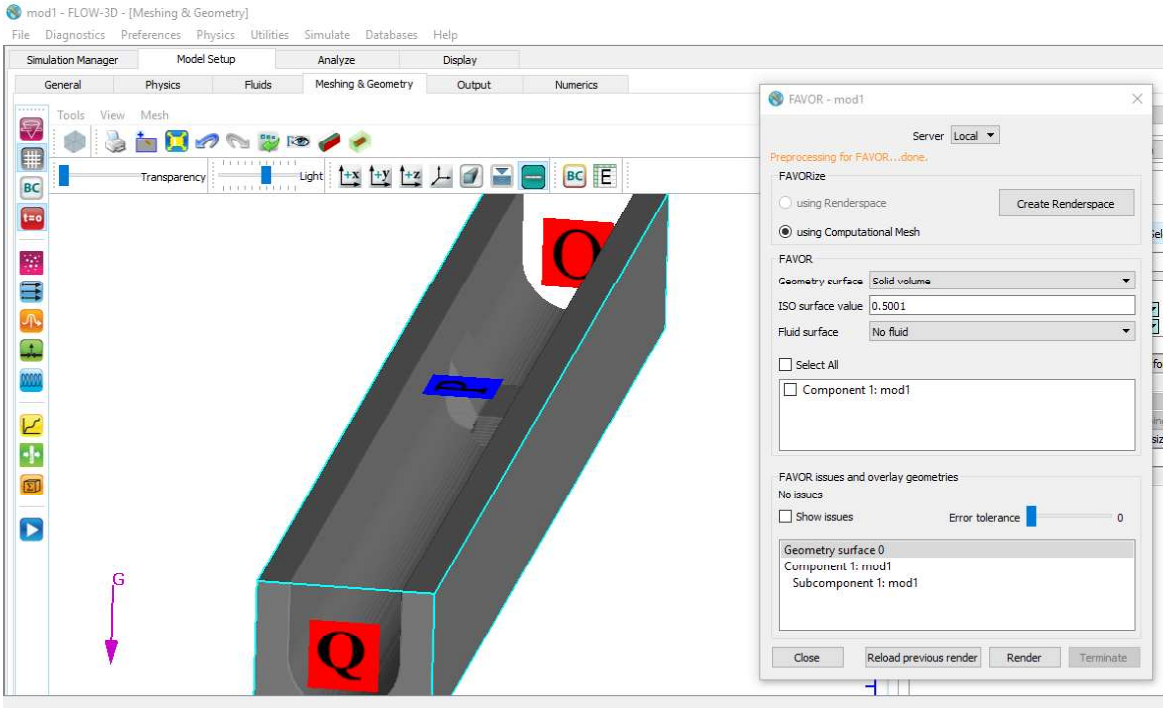
Se muestra a continuación las opciones escogidas y la vista del mallado realizado.

FIGURA 3.8 OPCIONES ESCOGIDAS PARA LA GENERACIÓN DEL MALLADO



FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

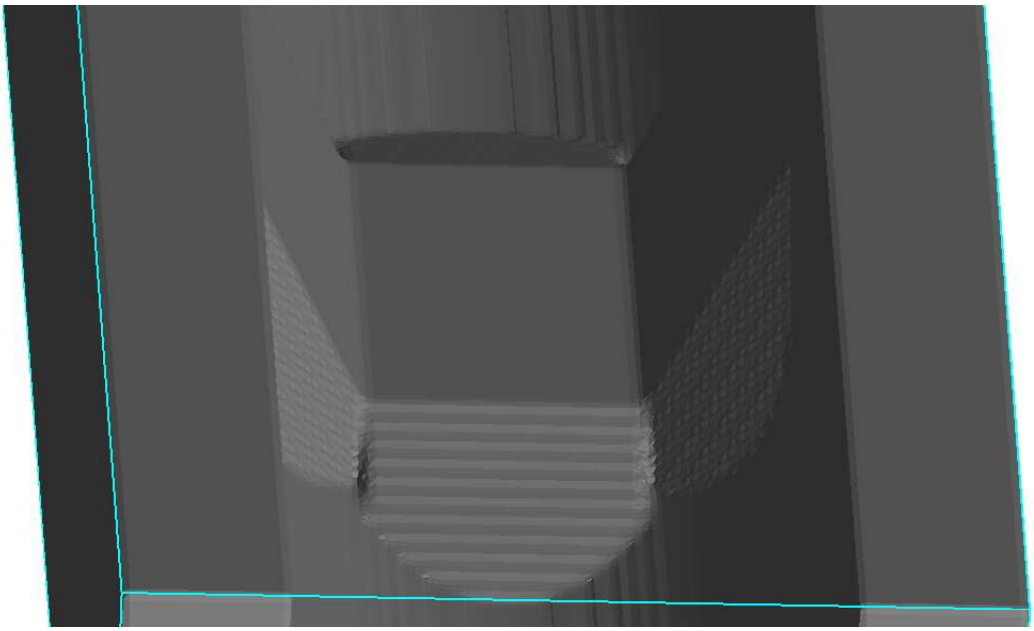
FIGURA 3.9 OPCIONES ESCOGIDAS PARA LA GENERACIÓN DEL MALLADO



FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

A continuación, se presenta un acercamiento al mallado realizado.

FIGURA 3.10 OPCIONES ESCOGIDAS PARA LA GENERACIÓN DEL MALLADO



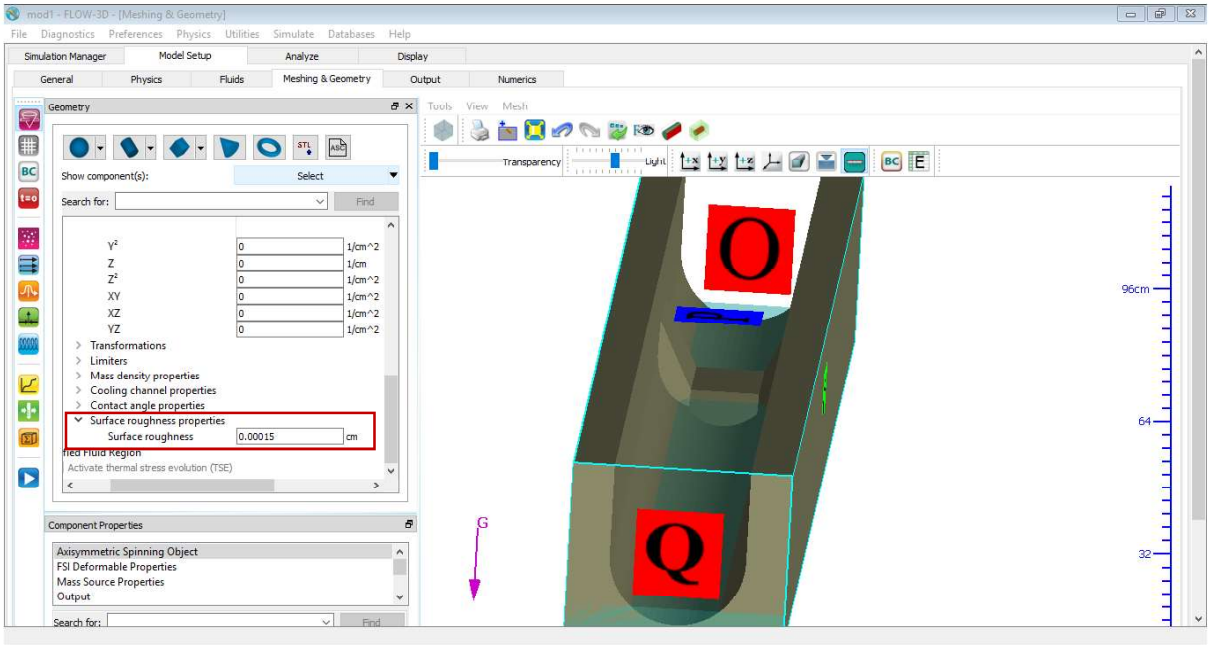
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

3.1.2 PARAMETROS HIDRÁULICOS

Esta es sin duda una de las partes principales en la modelación, debido a que aquí, el criterio como diseñador debe primar, las condiciones iniciales con las que el programa calculará todo tienen un carácter fundamental para que la estructura se comporte como debería.

Se comenzará partiendo de la introducción de la rugosidad de la tubería, para esto se parte sabiendo que la rugosidad del PVC es 0.0015 mm según la Tabla 8.1 Rugosidad absoluta en tubos comerciales (Sotelo, 1997)

FIGURA 3.11 INTRODUCCIÓN DE LA RUGOSIDAD DE LA TUBERÍA DE PVC



FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

Para introducir el caudal a ser modelado se partirá de la siguiente tabla obtenida en la modelación física realizada por (Torres & Vásquez, 2010), en donde se puede observar el caudal expresado en $\left(\frac{l}{s}\right)$.

CUADRO 3.1 PRUEBAS REALIZADAS EXPERIMENTALMENTE (TORRES & VÁSQUEZ, 2010)

Prueba	Q	LABORATORIO
	(l/s)	(cm)
1	3.683	10.097
2	6.052	12.145
3	9.359	14.280
4	12.705	15.995
5	15.780	17.335
6	18.663	18.452
7	22.047	19.627
8	24.818	20.508
9	27.740	21.375
10	30.003	22.007
11	36.577	23.688
12	40.180	24.528

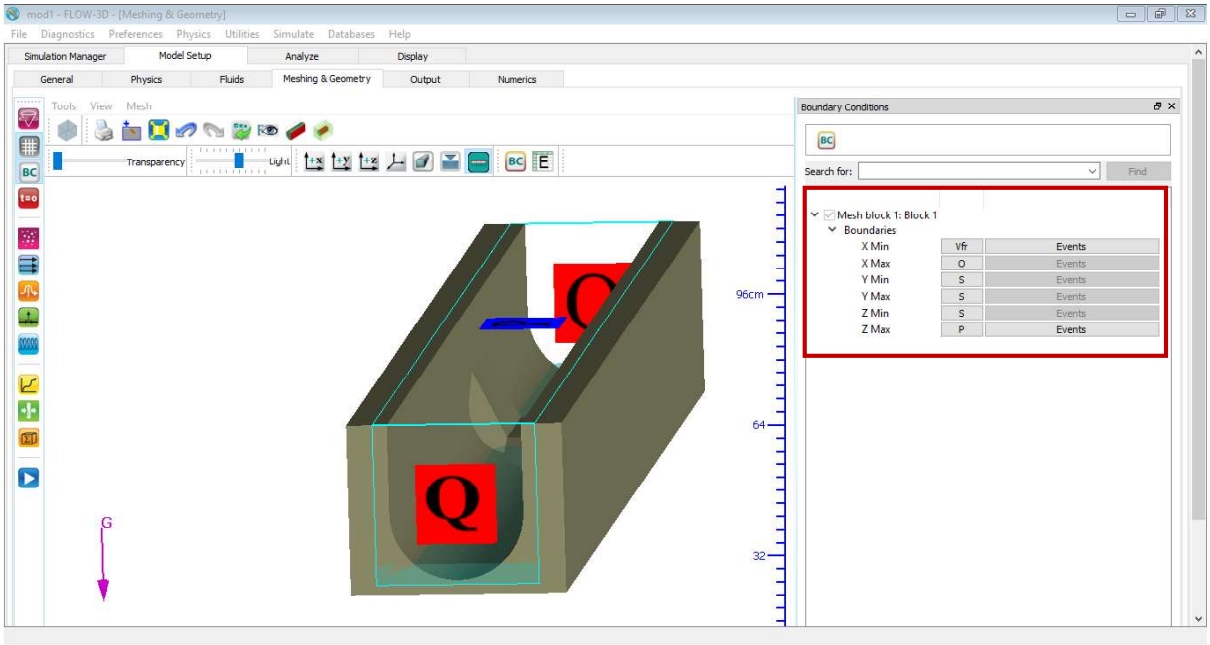
FUENTE: (Torres & Vásquez, 2010)
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

En esta etapa se trabajara con una prueba para calibrar el modelo, una vez alcanzado este objetivo se realizará las once pruebas para realizar la validación, para el proceso de calibración se trabajará con la prueba N#7 que tiene un caudal de $22.047\left(\frac{l}{s}\right)$, se escoge este caudal para realizar la calibración debido a que el mismo tiende a ser el promedio igual a $20.634\left(\frac{l}{s}\right)$, si analizamos solamente los valores extremos es decir la prueba N#1 y la prueba N#12 para ver el rango obtenemos que $\frac{Q_{min}+Q_{max}}{2} = 21.931\left(\frac{l}{s}\right)$, por lo que utilizar la prueba N#7 es acertada.

3.1.2.1 CONDICIONES DE BORDE

Este es uno de los parámetros más importantes en cualquier modelación, por lo que se prestó especial cuidado, como se manifestó anteriormente en el proceso de calibración se trabajó con la prueba N#7. Flow-3D al ser un programa que resuelve las ecuaciones de Navier – Stokes en tres dimensiones necesita que se establezcan seis condiciones de borde (debido a que el volumen de control tiene la forma de un cubo) es decir tiene seis lados, como se puede observar en la siguiente figura.

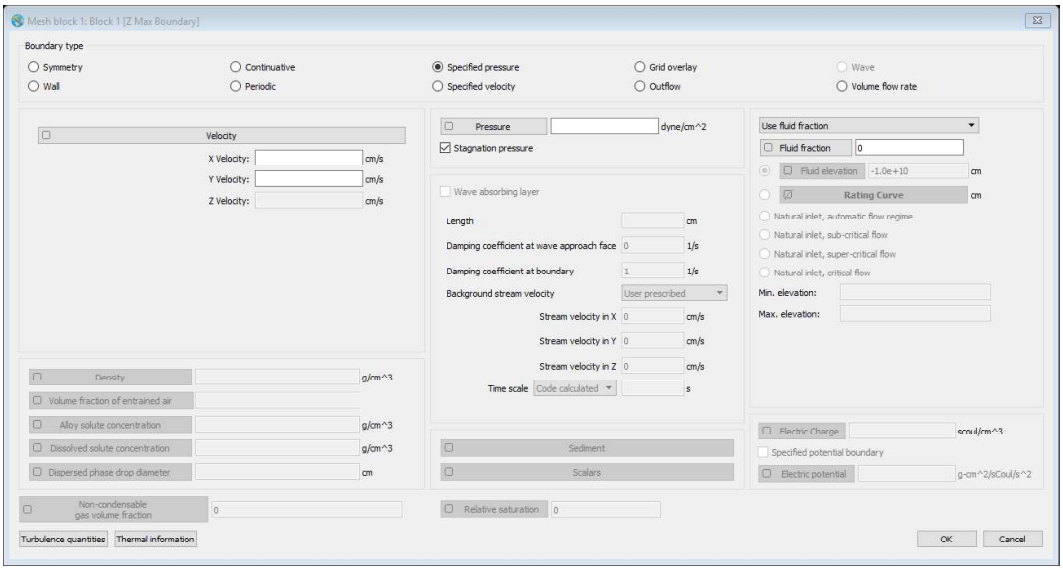
FIGURA 3.12 CONDICIONES DE BORDE DEL VOLUMEN DE CONTROL



FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

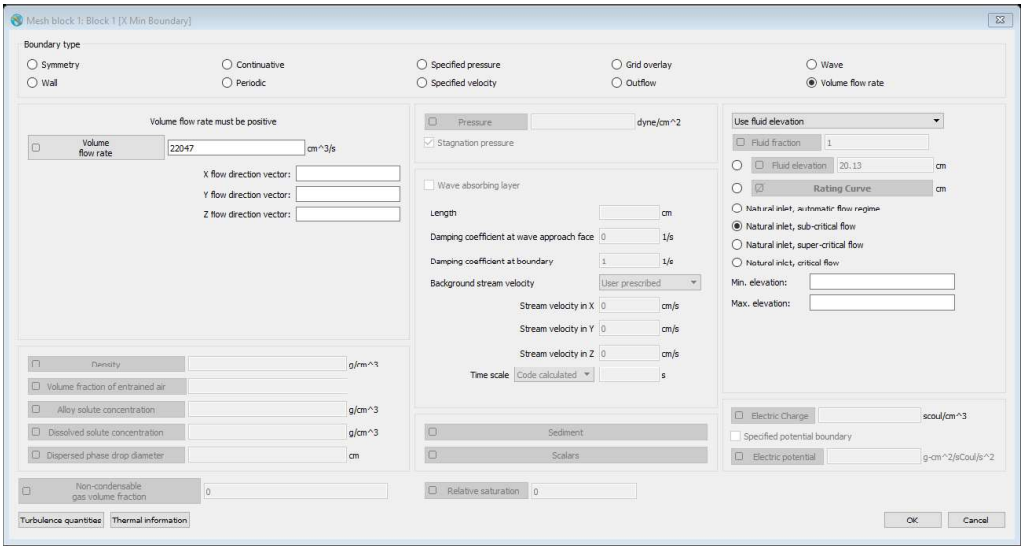
Por lo que para los lados del canal se escogió la opción “sólido”, al igual la base del canal, esto no permite que el agua salga por estas partes o a su vez entre, en la parte superior del canal para facilitar la modelación se introdujo la opción de presión igual a cero debido a que el agua no llega hasta este nivel, al inicio del canal introdujimos el caudal de la prueba N#7 igual a 22.047 $\left(\frac{l}{s}\right)$ y dejamos que el programa calcule automáticamente el calado estableciéndole que debe ser un flujo sub crítico (esto se realizó para no influir en la modelación y sistematizar el proceso para las modelaciones siguientes), y como salida al final del canal se introdujo la opción de descarga libre, esto se puede observar en las siguientes figuras.

FIGURA 3.13 CONDICIONES DE BORDE EN LA PARTE SUPERIOR DEL CANAL



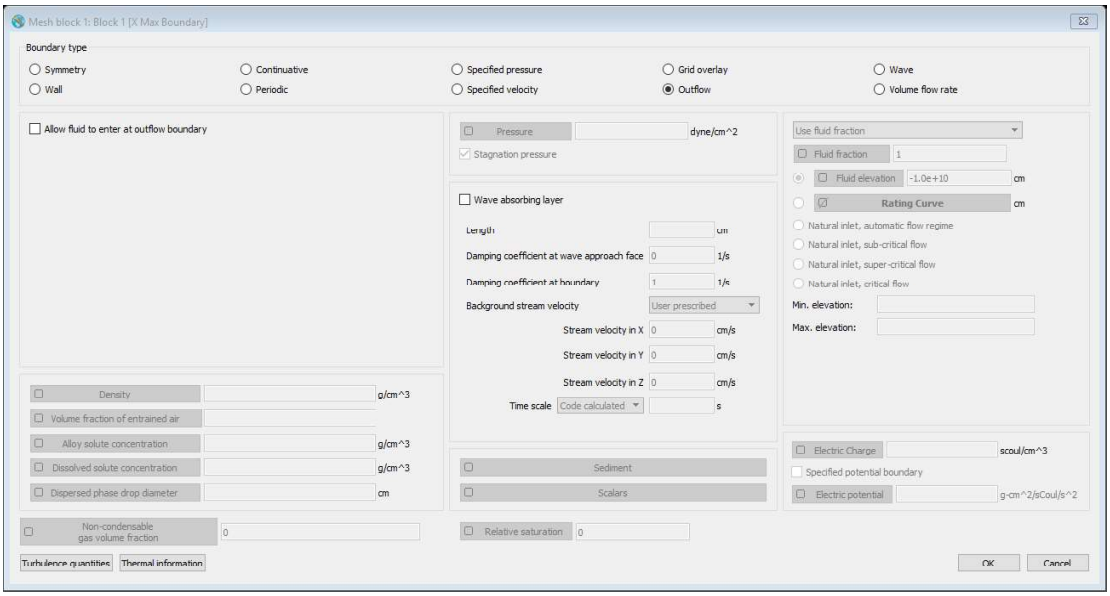
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

FIGURA 3.14 CONDICIONES DE BORDE EN LA ENTRADA DEL CANAL



FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

FIGURA 3.15 CONDICIONES DE BORDE EN LA SALIDA DEL CANAL



FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

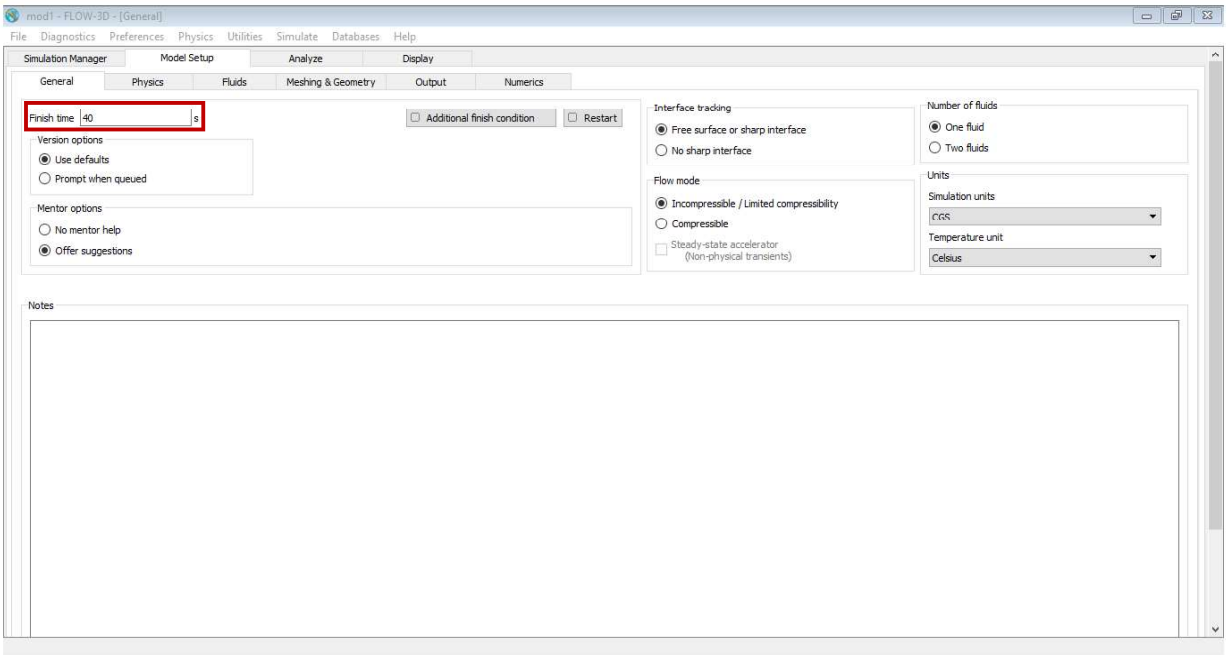
3.2 CALIBRACIÓN DEL MODELO Y ANALISIS DE SENSIBILIDAD

3.2.1 DEFINICIÓN DEL TIEMPO DE CORRIDA

El tiempo de corrida está definido como el intervalo en el cual el programa resolverá las ecuaciones descritas en el capítulo anterior e ira entregando resultados en un intervalo de tiempo (t) designado por defecto el programa entrega resultados cada décima de segundo, este tiempo de corrida es sumamente importante debido a que realizar una modelación sin que esta se haya estabilizado repercutirá directamente en la confianza de los resultados, sin embargo introducir un tiempo de corrida demasiado largo implicará gasto innecesario tanto en el uso de los equipos computacionales, como archivos de salida excesivamente grandes, por lo que es necesario investigar cual es el tiempo de corrida apropiado para tener buenos resultados y a su vez no demandar innecesariamente recursos computacionales y de tiempo.

Para comenzar se realizó la corrida tomando un tiempo de simulación de 40 segundos, y se analizó los resultados obtenidos. Estos se presentan a continuación.

FIGURA 3.16 INTRODUCCIÓN DEL TIEMPO DE SIMULACIÓN EN EL PROGRAMA



FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

Luego de realizar la simulación por 40 segundos se obtuvo que el modelo se comportó como régimen permanente en el tiempo 19.5 segundos con una variación de la media menor a 0.53%, al segundo 22.9 se tuvo una variación de la media igual a 0.483%, en el segundo 30.9 se tuvo una variación de la media igual a 0.011% y al segundo 35 una variación de la media igual a 0.001% como se puede observar en las siguientes figuras.

FIGURA 3.17 RESULTADOS EN EL TIEMPO DE SIMULACIÓN EN EL PROGRAMA

```
2.20505E+01    11948   1.28E-03  1.28E-03/vs
2.24517E+01    12262   1.28E-03  1.28E-03/vs
2.28518E+01    12575   1.28E-03  1.28E-03/vs

============= mentor tip ===============
      solution is nearly steady:
      variation from the mean is
 less than   4.8395E-01 %  at t=  2.29388E+01
========================================

2.32520E+01    12888   1.28E-03  1.28E-03/vs
2.36531E+01    13205   1.23E-03  1.23E-03/vs
```

```
2.92775E+01    16071   2.21E-03  2.21E-03/cx
2.96796E+01    16253   2.21E-03  2.21E-03/cx
3.00816E+01    16435   2.21E-03  2.21E-03/cx
3.04836E+01    16617   2.21E-03  2.21E-03/cx
3.08857E+01    16799   2.21E-03  2.21E-03/cx

============= mentor tip ===============
      solution is nearly steady:
      variation from the mean is
 less than   1.1135E-02 %  at t=  3.09740E+01
========================================
```

```
3.45041E+01    18437   2.21E-03  2.21E-03/cx
3.49061E+01    18619   2.21E-03  2.21E-03/cx

============= mentor tip ===============
      solution is nearly steady:
      variation from the mean is
 less than   1.1652E-03 %  at t=  3.49945E+01
========================================

3.53081E+01    18801   2.21E-03  2.21E-03/cx
3.57102E+01    18983   2.21E-03  2.21E-03/cx
```

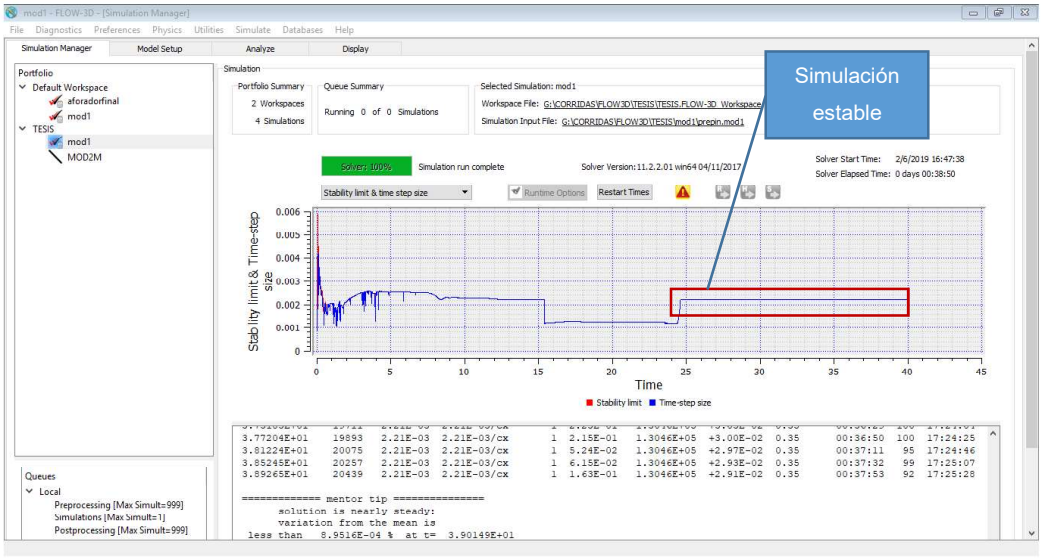
```
3.85245E+01    20257   2.21E-03  2.21E-03/cx
3.89265E+01    20439   2.21E-03  2.21E-03/cx

============= mentor tip ===============
      solution is nearly steady:
      variation from the mean is
 less than   8.9516E-04 %  at t=  3.90149E+01
========================================

3.93285E+01    20621   2.21E-03  2.21E-03/cx
3.97306E+01    20803   2.21E-03  2.21E-03/cx
```

FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

FIGURA 3.18 SIMULACIÓN ESTABLE DEL MODELO



FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

Se comparó los resultados respecto al calado obtenido en el modelo físico y en la modelación numérica, la medición del calado se la realizó en el punto, que según la

literatura es $\frac{D}{2}$ (Torres & Vásquez, 2010) desde el final del aforador, que para nuestro caso de estudio será a 167 cm medido desde el inicio del modelo en estos diferentes tiempos, como se expone a continuación.

CUADRO 3.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LA MODELACIÓN Y EL TIEMPO

TIEMPO (S)	CALADO		VARIACIÓN (%)
	MODELO (cm)	EXPERIMENTAL (cm)	
22.90	20.036	19.627	2.084
30.00	20.038	19.627	2.094
30.90	20.038	19.627	2.094
34.90	20.038	19.627	2.094
39.00	20.038	19.627	2.094

ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

En base a los resultados presentados en el CUADRO 3.2 se concluye que el tiempo óptimo para la simulación será 30 segundos, por lo que en el resto de simulaciones este será el tiempo a utilizar debido a que el tiempo de corrida no afecta en los resultados una vez que el modelo se ha estabilizado como se observa en el cuadro anterior.

3.2.1.1 DEFINICIÓN DEL MODELO DE TURBULENCIA A UTILIZAR

El proceso de calibración tiene como objetivo sistematizar la manera con la cual se realizará las diferentes modelaciones para obtener los resultados que se acerquen más a la realidad, en base a esta sistematización se procederá a realizar la modelación de la segunda etapa de este estudio.

Se estudiará la influencia de los diferentes tipos de modelos de turbulencia en el resultado de la modelación.

Según (Casa, 2016) del análisis del modelo de turbulencia, el que presenta mejores resultados es el modelo $k - \varepsilon$ renormalizado (RNG), razón por la cual partimos de este modelo y lo comparamos con los otros dos modelos que tiene el programa Two – equation $(k - \varepsilon)$ y Two – equation (k-w), se presenta a continuación los resultados.

CUADRO 3.3 COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE TURBULENCIA

Q (l/s)	Modelo (cm)	k-e model (cm)	RNG (cm)	k-w model (cm)
22.047	19.627	20.032	20.038	20.005

ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

Del resultado anterior se puede concluir que los modelos de turbulencia se ajustan muy bien entre ellos y la diferencia es 0.16% en el caso más crítico (RNG vs k-w model), por lo que se escoge el modelo RNG y también se hace válida la conclusión obtenida por (Casa, 2016), cabe recalcar el que modelo k-w no alcanzo a estabilizarse en los 30 segundos de corrida.

3.2.1.2 RUGOSIDAD DE LA TUBERÍA DE PVC

Para terminar el proceso de calibración se analizó el efecto de la rugosidad del PVC en la modelación se realizaron tres corridas la primera con una rugosidad igual a 0.0015 mm (recomendada por la bibliografía) y se varió está a 0.001 mm y 0.002 mm respectivamente se presenta a continuación los resultados.

CUADRO 3.4 COMPARACIÓN DE LA RUGOSIDAD DEL MATERIAL

Q (l/s)	Rugosidad (cm)	H (cm)	Diferencia (cm)
22.047	0.00020	20.037	0.001
	0.00015	20.038	0
	0.00010	20.036	0.002

ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

La diferencia que se encuentra entre los cambios de rugosidad es casi despreciable por lo que se utilizará la rugosidad de 0.0015 (mm) recomendada en la bibliografía.

3.2.1.3 DEFINICIÓN DEL TAMAÑO DEL MALLADO

Se analizará el efecto que tiene la dimensión del mallado en la solución del modelo, para lo que se analizarán dos escenarios, el primero es realizar la modelación con una dimensión del mallado igual a 0.5 cm y la segunda es realizar la misma modelación con una dimensión igual a 1 cm.

El modelo de 0.5 cm de dimensión tiene 4’397.330 celdas y el modelo de dimensión 1 cm tiene 581.627 celdas, es decir que el modelo de celdas igual a 0.5 cm es 7.5 veces mayor que el modelo de celdas igual a 1 cm, esto se traduce en tiempo de uso del computador como se observará en la siguiente tabla:

CUADRO 3.5 COMPARACIÓN ENTRE LAS LECTURAS OBTENIDAS UTILIZANDO DIFERENTE TAMAÑO DE CELDAS

Tamaño Celda	**H**	**Uso Computador**
(cm)	**(cm)**	**(horas)**
0.5	10.645	9.0
1	10.637	1.0
Diferencia (cm)	**0.008**	**8.0**

ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

Al revisar los resultados se observa que la diferencia entre las dos modelaciones es 0.008 cm sin embargo las horas que le toma al computador el terminar la modelación son significativamente más grandes (ocho horas), por lo que al ser la diferencia despreciable entre las dos modelaciones se utilizará el tamaño de celda igual a 1 cm para optimizar los recursos.

3.2.1.4 RESULTADOS DEL ANALIS DE SENSIBILIDAD Y CALIBRACIÓN DEL MODELO

Resumiendo, el análisis de los parámetros hidráulicos y luego de haber realizado el análisis de sensibilidad tenemos:

El tiempo de corrida a ser usado será de 30 segundos.

La condición de borde aguas arriba del modelo será Flujo Subcrítico automáticamente calculado por el programa, solo se colocará el caudal a simular en la pantalla de ingreso de datos aguas arriba.

La condición de borde aguas abajo del canal será una descarga libre.

La rugosidad será la propuesta por (Chow, 2004), para el PVC es decir 0.0015 mm.

Se utilizará el método de turbulencia RNG.

El tamaño de mallado será 1 cm para todas las modelaciones.

3.3 VALIDACIÓN DEL MODELO

Para validar el modelo se realizarán 11 simulaciones cada una de las simulaciones cumplirá el apartado 3.2.1.4, se presenta las capturas de pantalla de las 11 simulaciones en ANEXO N# 1 - RESULTADOS DE LA MODELACIÓN DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=33 CM.

Cabe recalcar que todas las simulaciones al final del tiempo de modelación (30 segundos) se comportaron de manera estable, es decir, su flujo fue muy cercano a permanente, por lo que se validó el tiempo de corrida.

La toma de datos se lo realizo en el mismo punto donde en la realidad se tomó las mediciones en laboratorio, es decir a D del inicio del medidor Palmer-Bowlus.

Se presenta a continuación el cuadro resumen de la etapa de validación.

CUADRO 3.6 RESUMEN DE LOS CALADOS CALCULADOS Y LA DIFERENCIA FRENTE A LOS CALADOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE

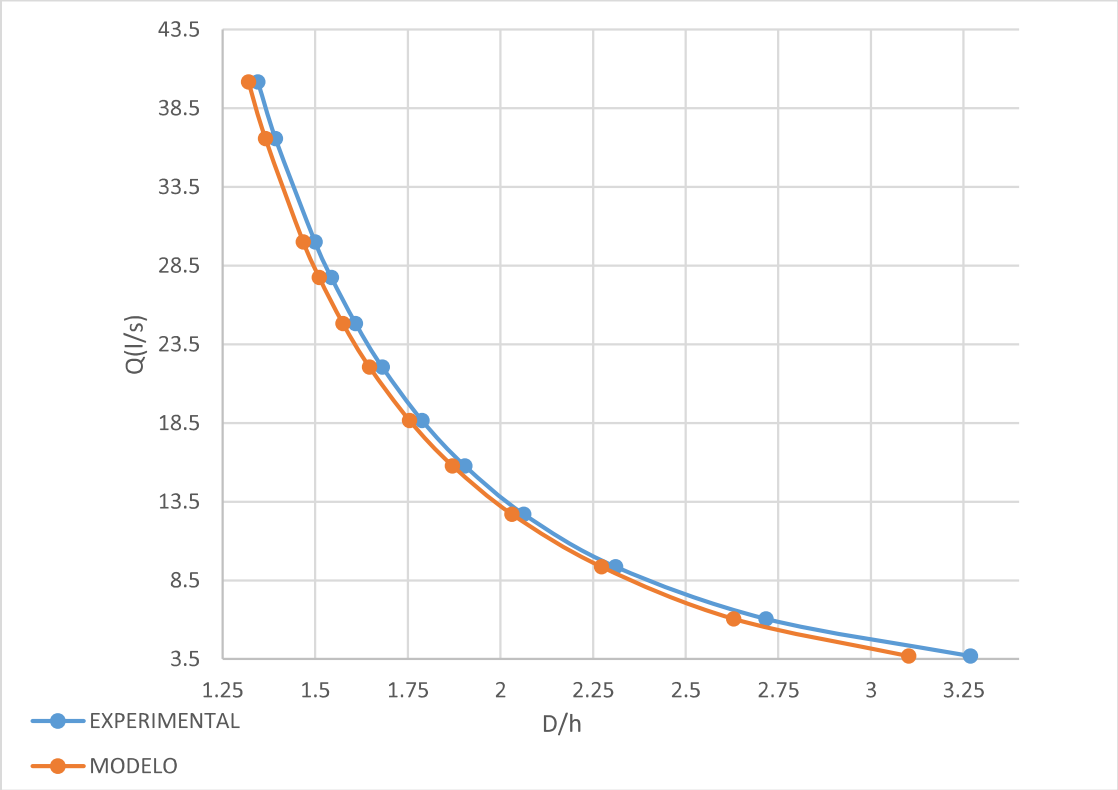
Prueba	Q (L/s)	LABORATORIO (cm)	MODELO (cm)	DIFERENCIA (%)
1	3.683	10.097	10.640	5.378
2	6.052	12.145	12.548	3.318
3	9.359	14.280	14.520	1.681
4	12.705	15.995	16.247	1.575
5	15.780	17.335	17.642	1.771
6	18.663	18.452	18.806	1.918
7	22.047	19.627	20.038	2.094
8	24.818	20.508	20.953	2.170
9	27.740	21.375	21.842	2.185
10	30.003	22.007	22.475	2.127
11	36.577	23.688	24.162	2.001
12	40.180	24.528	25.000	1.924
			PROMEDIO	**2.345**

ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

Como conclusión podemos decir que el error promedio es igual a 2.345% que es mucho menor al 10% aceptado en la literatura (Casa, 2016), se tiene una distorsión mayor en los dos primeros caudales de ahí se mantiene la tendencia a tener un error relativo de aproximadamente 2% por lo que se puede concluir que el modelo se encuentra validado.

Para ilustrar de mejor manera lo expresado en el párrafo anterior se presenta a continuación la curva de descarga obtenida en laboratorio versus la curva de descarga obtenida en el modelo, como se puede observar la curva obtenida del modelo numérico representa fielmente la obtenida en laboratorio por lo que la validación fue exitosa.

CUADRO 3.7 CURVA DE DESCARGA MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=33 CM



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

CAPÍTULO 4.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 ESCOGIMIENTO DE LOS DIAMETROS DE TUBERIA COMERCIAL PARA LA MODELACIÓN.

Tomando como base la información suministrada por la EPMAPS, mediante un archivo de GIS, en el cual contiene la información de los sistemas de alcantarillado del Distrito Metropolitano de Quito y algunas parroquias cercanas. La información de los sistemas de alcantarillado contiene el tipo de material de la tubería, el diámetro, la longitud del tramo, cotas, pendientes y caudales (solamente en algunas tuberías).

La longitud total catastrada de redes Primarias, Secundarias, Terciarias y Canales de saneamiento del DMQ es de 5552,867 km de Redes. En 194605 Secciones de Red.

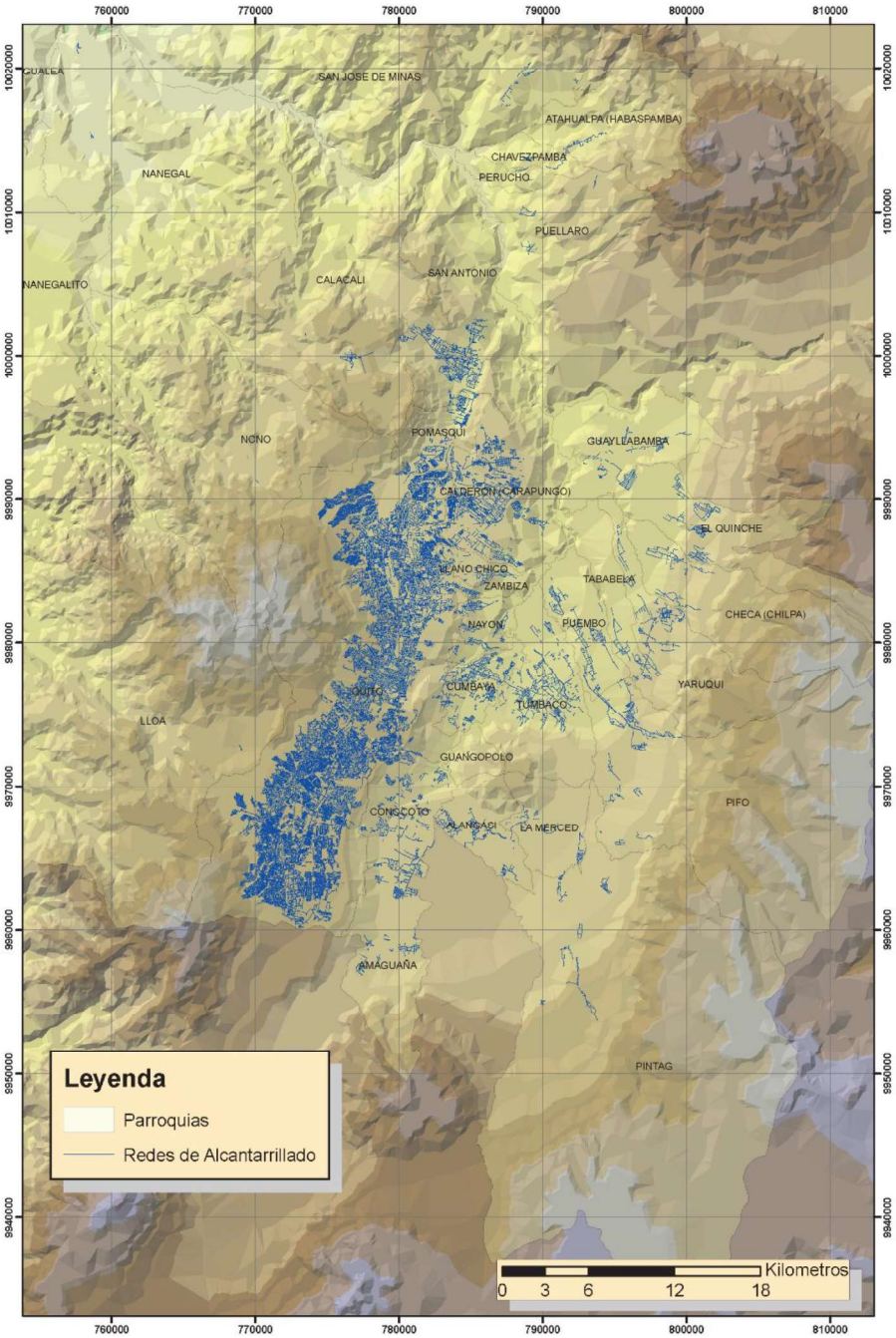
De estos 883 km, corresponden a ductos tipo cajón, canales abiertos revestidos, no revestidos y zanjas en 20657 secciones de red que no se consideraran para el estudio al no ser tuberías de sección circular, por lo que el universo utilizado para el presente estudio representa 173948 tuberías.

El presente estudio tomará como universo el total de tuberías sin considerar su material, también no se toma en cuenta si las tuberías están al final de la red, es decir son tuberías de descarga, debido a que por la orografía del DQM usualmente las tuberías de descarga presentan pendientes pronunciadas, por lo que tener flujo subcrítico en estas tuberías es físicamente imposible, y al ser el medidor Palmer-Bowlus producto de este estudio, un medidor que funciona en régimen subcrítico imposibilitará su instalación en tuberías que no cumplan con esta característica fundamental.

El principal objetivo de tomar como universo del estudio la totalidad de tuberías es encontrar efectivamente cuales son los tres diámetros de tubería más utilizados, para que el resultado de este estudio pueda ser aplicado en campo.

Se presenta a continuación el mapa de las tuberías y su ubicación en el DQM.

FIGURA 4.1 MAPA DE LAS TUBERIAS DE ALCANTARILLADO UBICADAS EN EL DMQ



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

Este mapa puede ser visualizado de mejor manera en el ANEXO N#6.

Una vez analizada la información se presenta a continuación el cuadro de resultados y los tres diámetros escogidos para la modelación.

CUADRO 4.1 RESUMEN DEL NUMERO DE TUBERIAS RESPECTO A SU DIÁMETRO

DIAMETRO (MM)	N# TUBERIAS	PORCENTAJE (%)
100	44	0.025
110	431	0.248
150	1756	1.009
160	**47032**	**27.038**
200	**48418**	**27.835**
250	**24886**	**14.307**
300	7796	4.482
315	**13453**	**7.734**
350	867	0.498
400	**10289**	**5.915**
450	2698	1.551
500	4660	2.679
535	206	0.118
550	817	0.470
600	2848	1.637
615	1617	0.930
650	82	0.047
700	1928	1.108
750	116	0.067
785	49	0.028
800	1654	0.951
850	8	0.005
900	761	0.437
1000	952	0.547
1100	23	0.013
1200	535	0.308
1300	1	0.001
1400	7	0.004
1500	4	0.002
1600	9	0.005
7000	1	0.001
TOTAL	**173948**	**100**

ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

Basados en la información presentada en el cuadro anterior se escogió las tuberías de D=160 mm, D=200 mm, D=250mm y D=400 mm para realizar las modelaciones, cabe recalcar que se excluyó la tubería D=315 mm porque actualmente en el mercado ecuatoriano la producción de este diámetro de tubería es inexistente, este tipo de

tuberías fueron utilizadas en años anteriores debido a que eran fabricadas de cemento, sin embargo hoy en día la mayor parte de alcantarillados se fabrican con PVC y por lo tanto, como el objetivo de este proyecto es proveer herramientas a los diseñadores y al personal encargado del mantenimiento y control de los sistemas de alcantarillado se decidió en lugar de incluir la tubería D=315 mm optar por la tubería de D=400 mm, que es fabricada en PVC

4.2 MODELACIÓN CFD DE LAS DIFERENTES GEOMETRÍAS

Una vez escogidas los diámetros a utilizarse se realizó las diferentes simulaciones.

4.2.1 MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=16 CM

Con la metodología expuesta en el capítulo 3.1.1 se realiza el diseño geométrico del medidor Palmer-Bowlus a continuación.

Para el caso que D=16 cm se tiene que:

$$D = B = 16\ (cm)$$

$$a = \frac{D}{6} = 2.66\ (cm)$$

$$b = \frac{D}{2} = 8.00\ (cm)$$

$$i_t = 2{:}1\ (pendiente)$$

$$i_l = 1{:}3\ (pendiente)$$

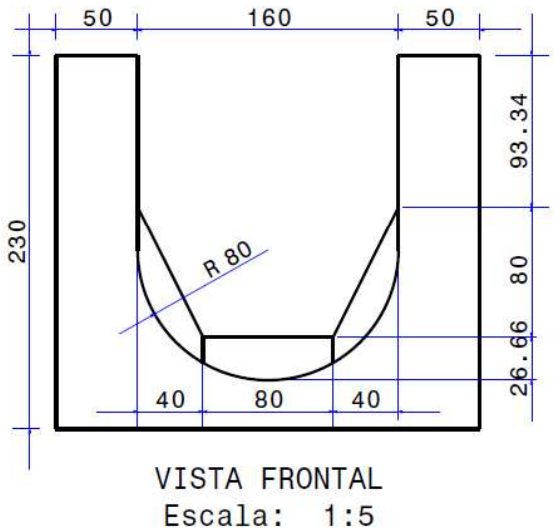
$$H = \frac{(B - b) \times i_t}{2} = 8.00\ (cm)$$

$$L = D = 16\ (cm)$$

$$L_q = L + \frac{2a}{i_l} = 32\ (cm)$$

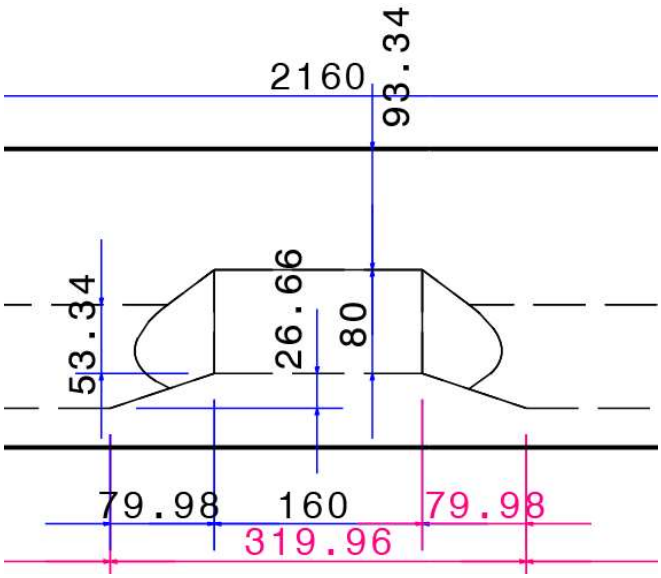
Con lo que se procedió a realizar la geometría.

FIGURA 4.2 DIMENSIONES DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS DE D=16 (CM) (CORTE)



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

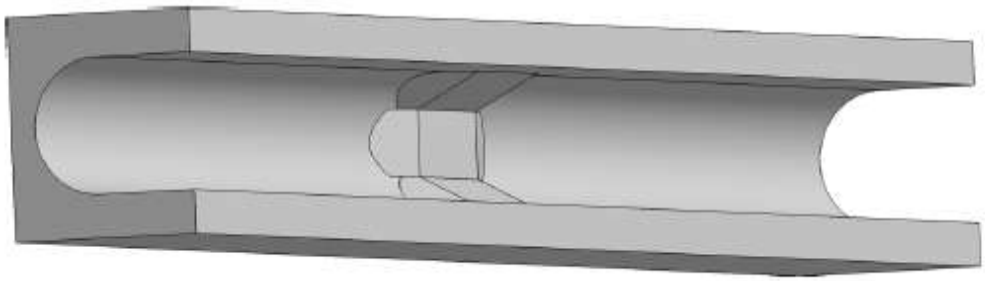
FIGURA 4.3 DIMENSIONES DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS DE D=16 (CM) (PERFIL)



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

Con esta información se realizó el modelo 3D del medidor y se presenta a continuación la renderización del mismo:

FIGURA 4.4 MODELO 3D DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=16 CM



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

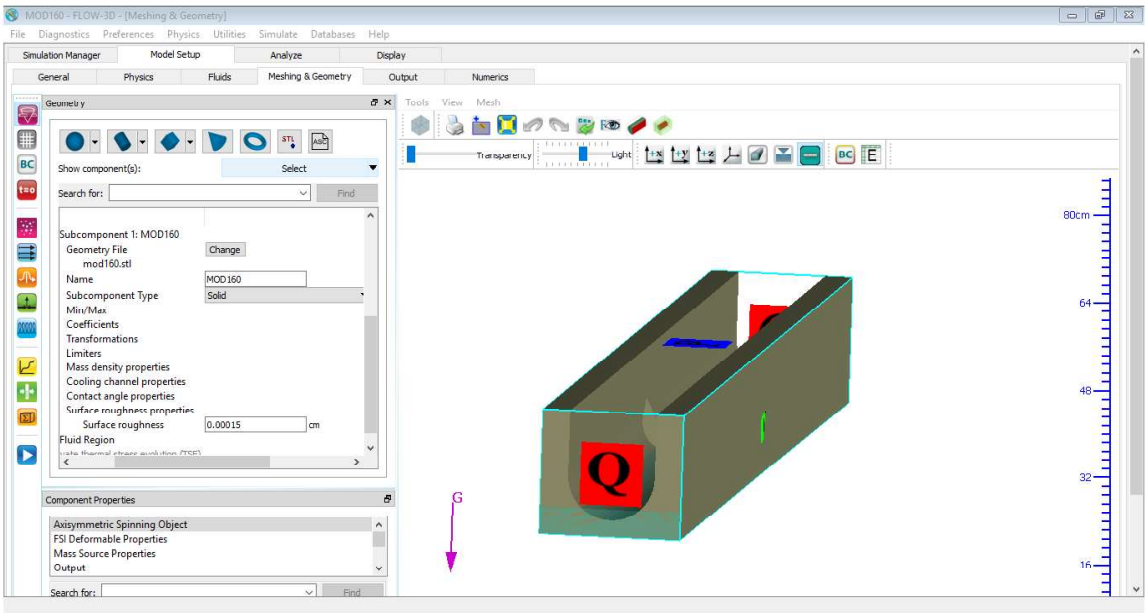
4.2.1.1 SIMULACIÓN MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=16CM

Se realizarán 11 simulaciones cada una de las simulaciones cumplirá el apartado 3.2.1.4, se presenta las capturas de pantalla de las 11 simulaciones en el Anexo N#2.

La toma de datos se lo realizo a la longitud de D del inicio del medidor Palmer-Bowlus como se explicó en la etapa de calibración y validación del medidor Palmer-Bowlus de D=33 cm, es decir que en esta modelación se obtuvo los datos a una longitud de 86 cm del inicio del modelo.

Se presenta a continuación la captura de pantalla de la geometría, ingreso de rugosidad, condiciones de borde y ejemplo de salida del programa.

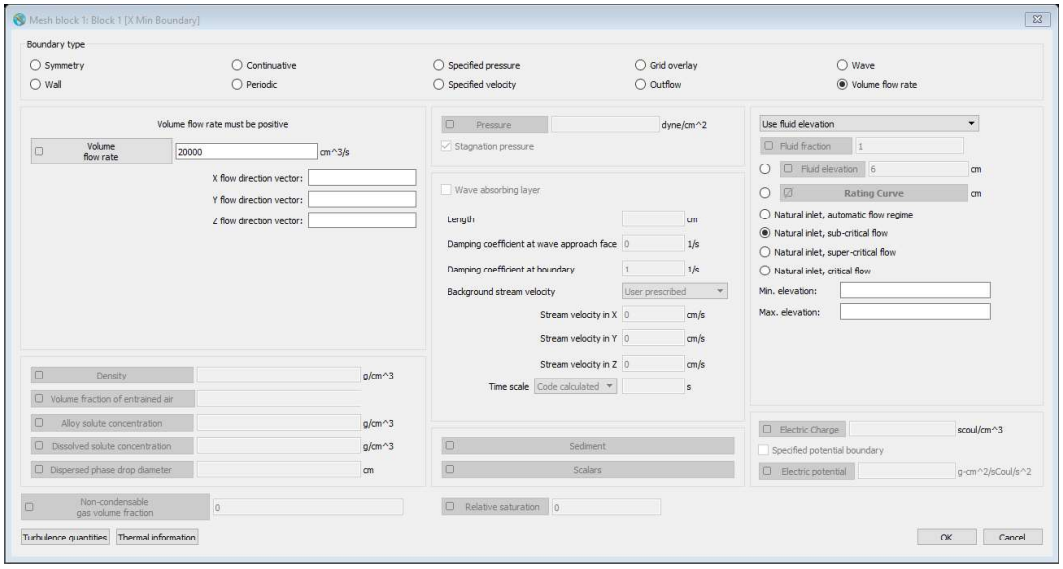
FIGURA 4.5 GEOMETRÍA PALMER-BOWLUS D=16 CM



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

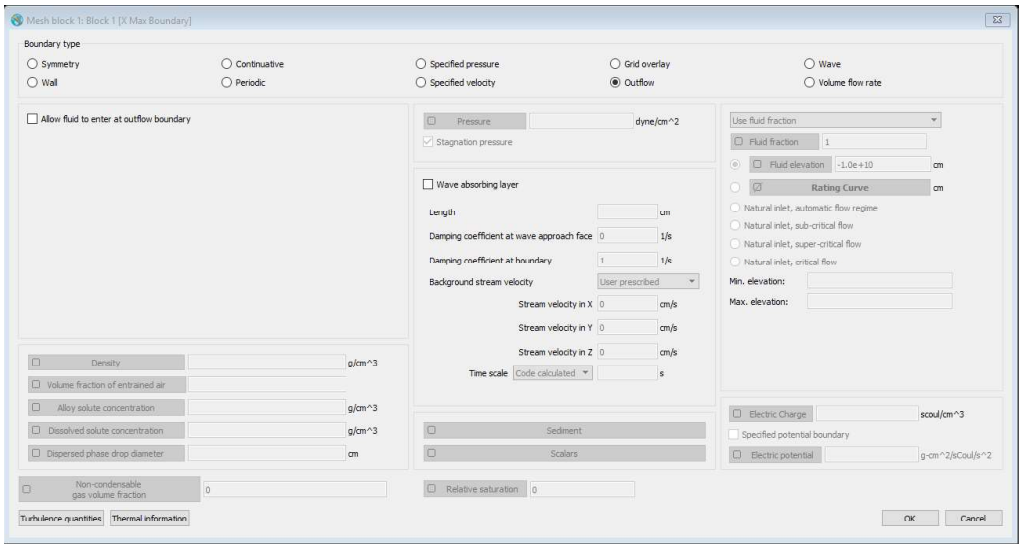
Se presenta a continuación un ejemplo de las condiciones de borde inicial y final del modelo.

FIGURA 4.6 CONDICIONES DE BORDE INICIAL PALMER-BOWLUS D=16 CM



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

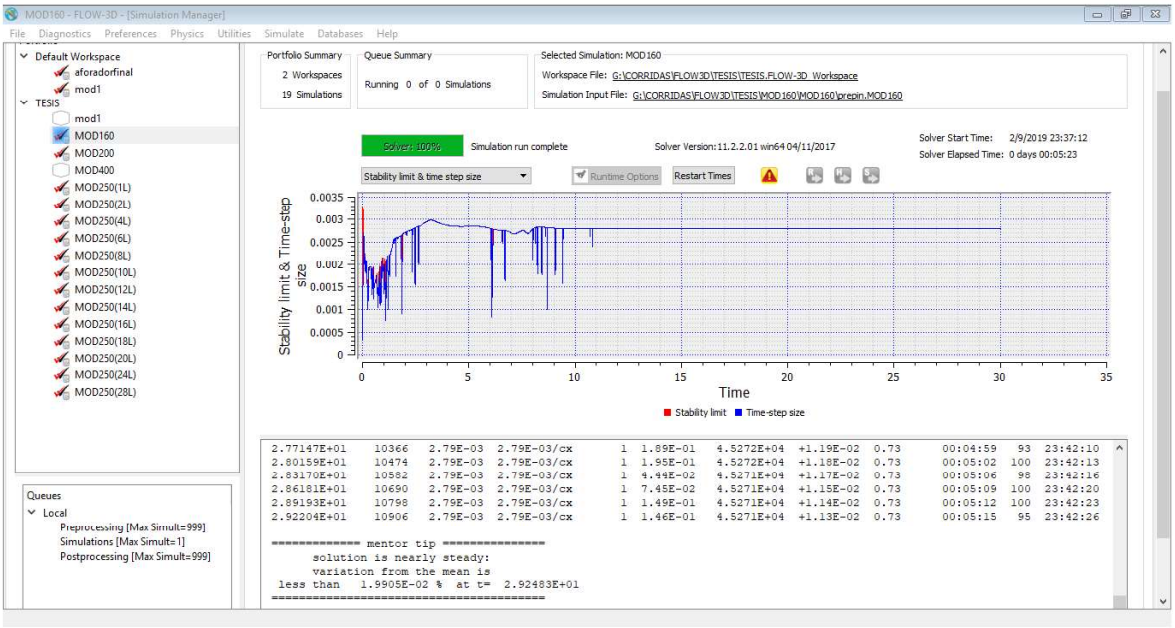
FIGURA 4.7 CONDICIONES DE BORDE FINAL PALMER-BOWLUS D=16 CM



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

Se presenta a continuación un ejemplo de pantalla de resultados de la modelación.

FIGURA 4.8 EJEMPLO PANTALLA DE RESULTADOS PARA EL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=16 CM



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

En el mismo se puede observar que el modelo se estabilizo y su funcionamiento es como flujo permanente, a continuación, se presenta el número de pruebas a ser simuladas (11 simulaciones).

CUADRO 4.2 RESUMEN DE LOS CAUDALES SIMULADOS PARA EL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=16 CM

Prueba	Q
	(l/s)
1	1.00
2	2.00
3	4.00
4	6.00
5	8.00
6	10.00
7	12.00
8	14.00
9	16.00
10	18.00
11	20.00

ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

Los resultados de las distintas modelaciones se pueden observar en el ANEXO N# 2 - RESULTADOS DE LA MODELACIÓN DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=16 CM

Se presenta a continuación el cuadro resumen.

CUADRO 4.3 RESUMEN DE LOS CALADOS SIMULADOS VS EL RESULTADO TEÓRICO PARA EL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=16CM

Prueba	Q (l/s)	ANALISIS DIMENSIONAL (cm)	SIMULACION (cm)	DIFERENCIA (%)
1	1.00	5.903	6.03200	2.190
2	2.00	7.615	7.69500	1.054
3	4.00	9.878	9.99600	1.190
4	6.00	11.527	11.63300	0.916
5	8.00	12.870	12.93400	0.497
6	10.00	14.025	14.07200	0.338
7	12.00	15.047	15.11200	0.432
8	14.00	15.972	16.06700	0.596
9	16.00	16.820	17.04000	1.306
10	18.00	17.608	17.83300	1.280
11	20.00	18.344	18.63800	1.602
			PROMEDIO	**1.036**

ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

4.2.2 MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=20 CM

Con la metodología expuesta en el capítulo 3.1.1 se realiza el diseño geométrico del medidor Palmer-Bowlus a continuación.

Para el caso que D=20 cm se tiene que:

$$D = B = 20\ (cm)$$

$$a = \frac{D}{6} = 3.33\ (cm)$$

$$b = \frac{D}{2} = 10\ (cm)$$

$$i_t = 2{:}1\ (pendiente)$$

$$i_l = 1{:}3\ (pendiente)$$

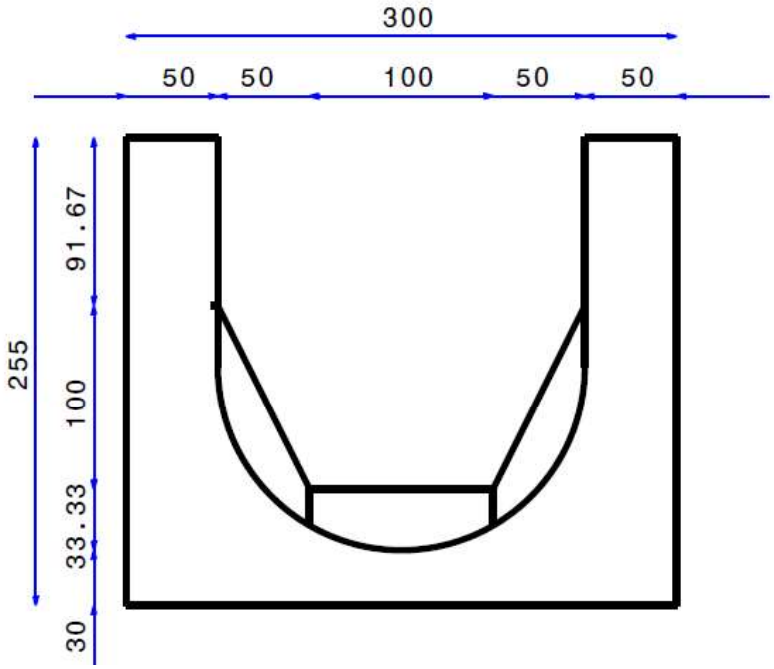
$$H = \frac{(B - b) \times i_t}{2} = 10.0\ (cm)$$

$$L = D = 20\ (cm)$$

$$L_q = L + \frac{2a}{i_l} = 40\ (cm)$$

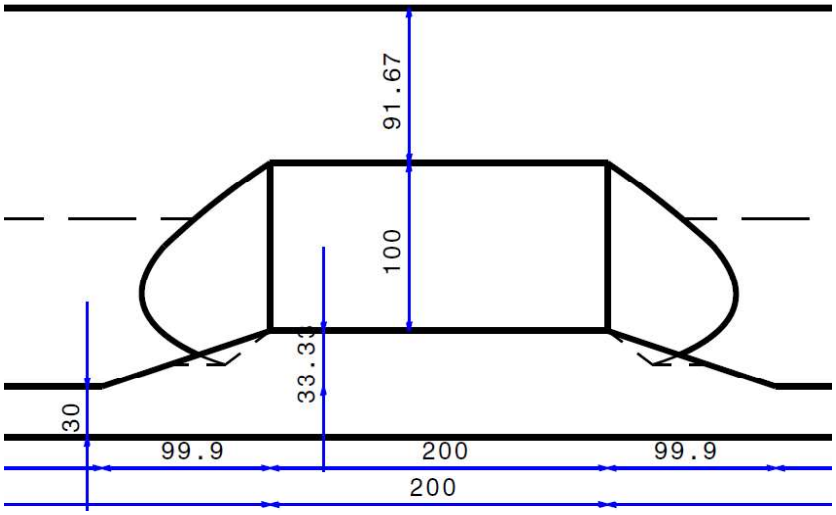
Con lo que se procedió a realizar la geometría.

FIGURA 4.9 DIMENSIONES DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS DE D=20 (CM) (CORTE)



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

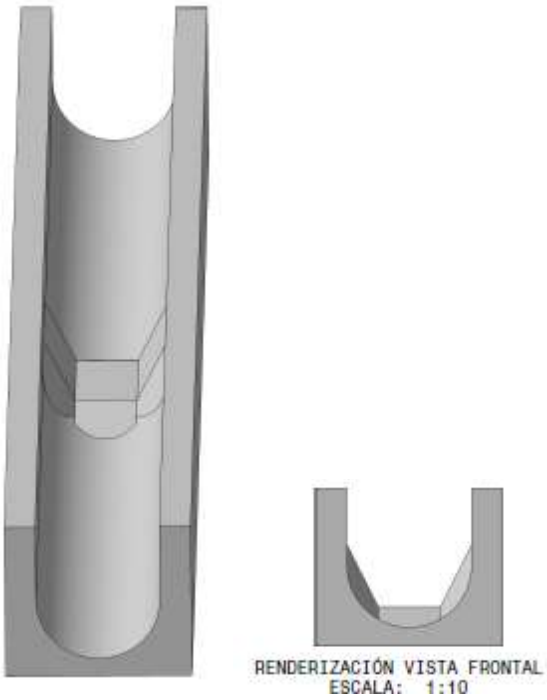
FIGURA 4.10 DIMENSIONES DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS DE D=20 (CM) (PERFIL)



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

Con esta información se realizó el modelo 3D del medidor y se presenta a continuación la renderización del mismo

FIGURA 4.11 MODELO 3D DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=20 CM



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

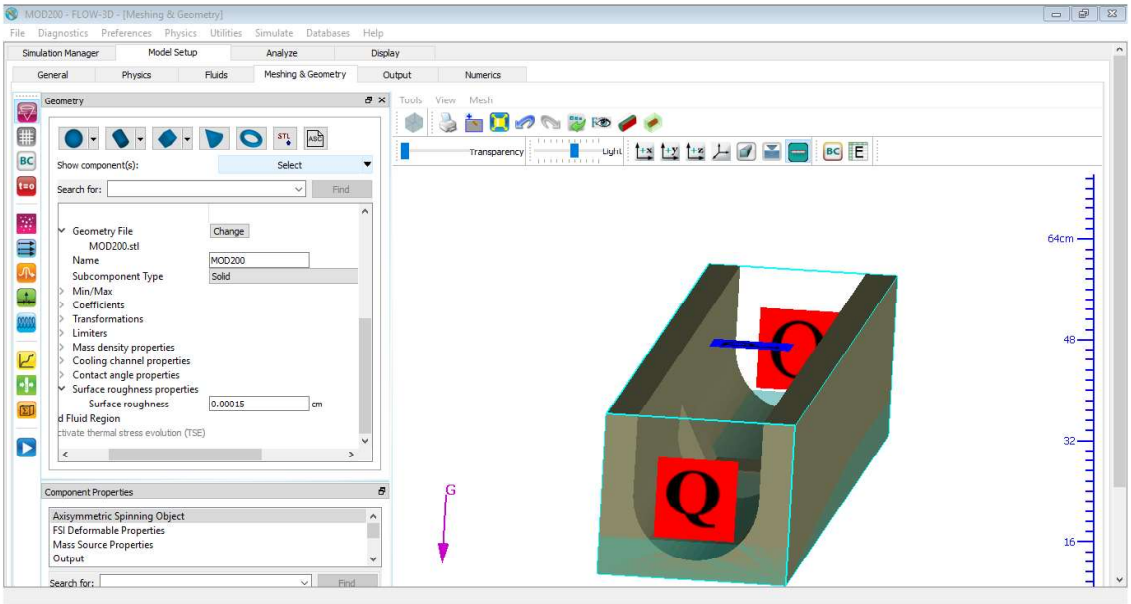
4.2.2.1 SIMULACIÓN MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=20 CM

Se realizarán 13 simulaciones cada una de las simulaciones cumplirá el apartado 3.2.1.4, se presenta las capturas de pantalla de las 13 simulaciones en el Anexo N#3.

La toma de datos se lo realizo a la longitud de D del inicio del medidor Palmer-Bowlus, el punto de obtención de resultados se encuentra a una longitud de 100 cm del inicio del modelo.

Se presenta a continuación la captura de pantalla de la geometría, ingreso de rugosidad, condiciones de borde y ejemplo de salida del programa.

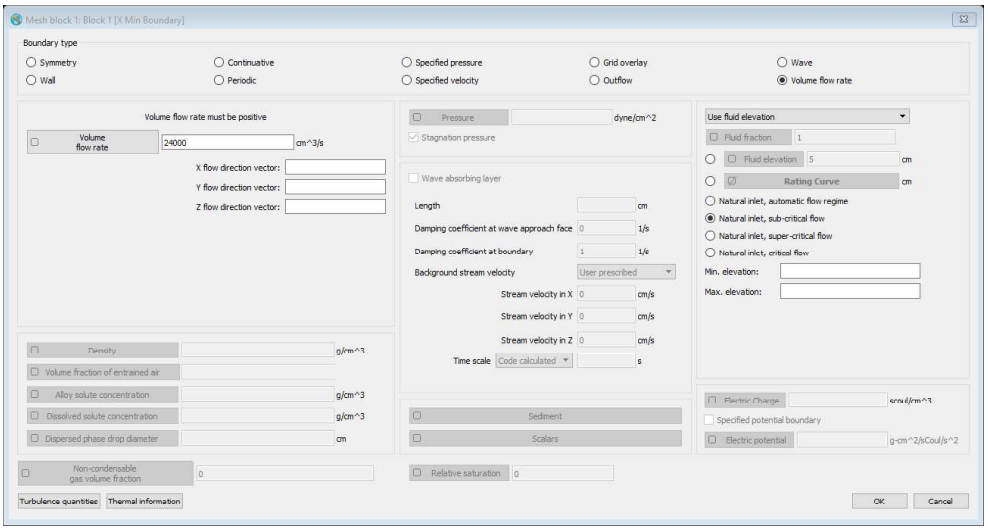
FIGURA 4.12 GEOMETRÍA E INGRESO DE RUGOSIDAD PALMER-BOWLUS D=20 CM



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

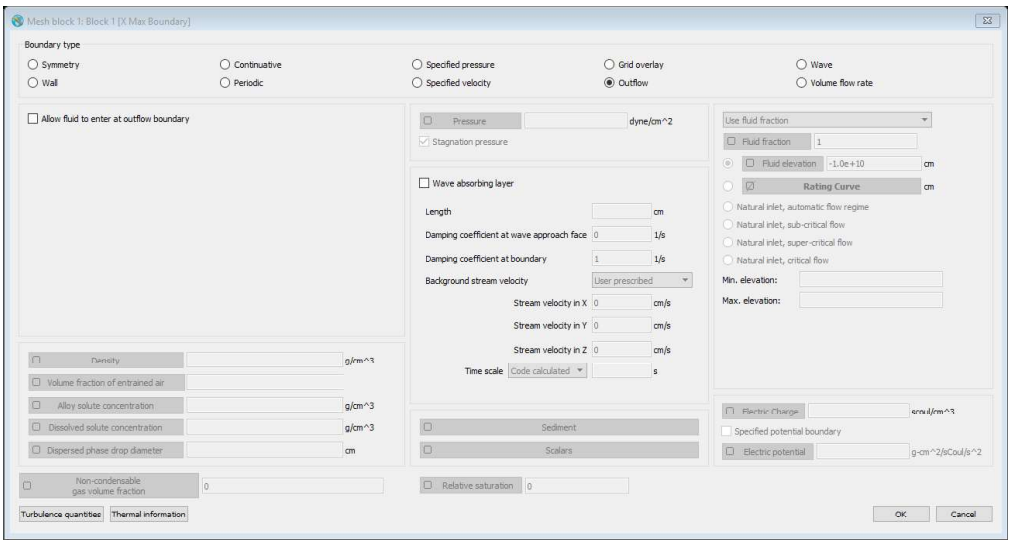
Se presenta a continuación un ejemplo de las condiciones de borde inicial y final del modelo.

FIGURA 4.13 CONDICIONES DE BORDE INICIAL PALMER-BOWLUS D=20 CM



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

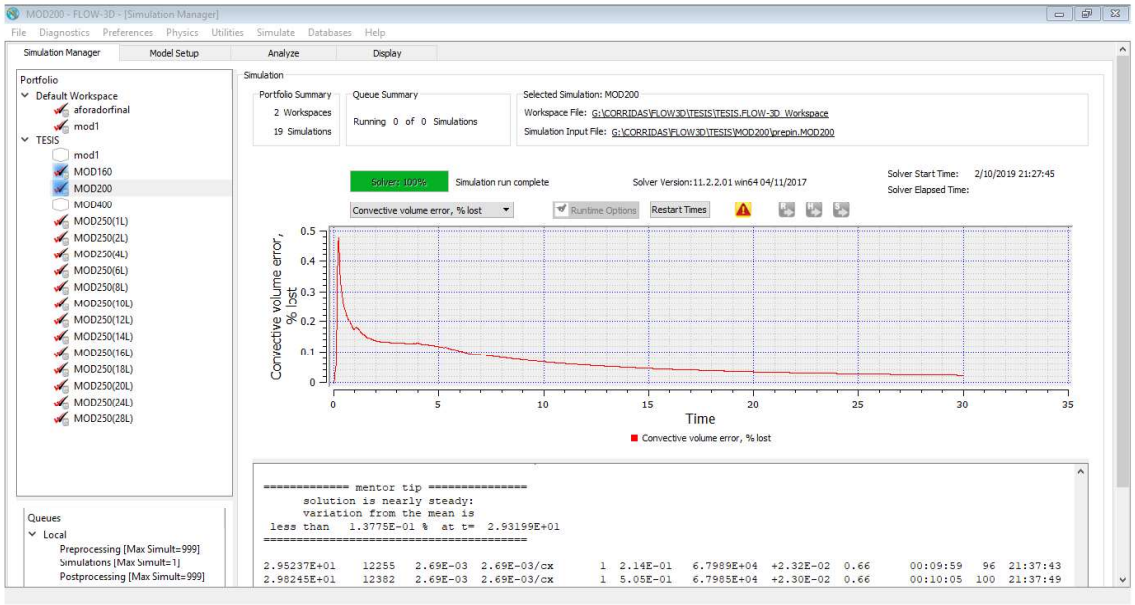
FIGURA 4.14 CONDICIONES DE BORDE FINAL PALMER-BOWLUS D=20 CM



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

Se presenta a continuación un ejemplo de pantalla de resultados de la modelación.

FIGURA 4.15 EJEMPLO PANTALLA DE RESULTADOS PARA EL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=20 CM



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

Se puede observar que el modelo se estabilizo y su funcionamiento es como flujo permanente, a continuación, se presenta el número de pruebas a ser simuladas que para el caso en estudio constituyen 13 simulaciones.

CUADRO 4.4 RESUMEN DE LOS CAUDALES SIMULADOS PARA EL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=20 CM

Prueba	Q
	(l/s)
1	1.00
2	2.00
3	4.00
4	6.00
5	8.00
6	10.00
7	12.00
8	14.00
9	16.00
10	18.00
11	20.00
12	22.00
13	24.00

ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

Una vez realizadas las modelaciones los resultados de las mismas se pueden observar en el ANEXO N# 3 - RESULTADOS DE LA MODELACIÓN DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=20 CM por lo que se presenta a continuación el cuadro resumen.

CUADRO 4.5 RESUMEN DE LOS CALADOS SIMULADOS VS EL RESULTADO TEÓRICO PARA EL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=20 CM

Prueba	Q	ANALISIS DIMENSIONAL	SIMULACION	DIFERENCIA
	(l/s)	(cm)	(cm)	(%)
1	1.00	6.044	6.336	4.837
2	2.00	7.751	7.896	1.875
3	4.00	10.011	10.142	1.308
4	6.00	11.657	11.830	1.480
5	8.00	12.999	13.192	1.481
6	10.00	14.153	14.332	1.268
7	12.00	15.175	15.323	0.978
8	14.00	16.099	16.239	0.870
9	16.00	16.947	17.051	0.613
10	18.00	17.734	17.831	0.548
11	20.00	18.470	18.586	0.629
12	22.00	19.163	19.294	0.684
13	24.00	19.819	19.967	0.744
			PROMEDIO	**1.332**

ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

4.2.3 MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=25 CM

Con la metodología expuesta en el capítulo 3.1.1 se realiza el diseño geométrico del medidor Palmer-Bowlus a continuación.

Para el caso que D=25 cm se tiene que:

$$D = B = 25\ (cm)$$

$$a = \frac{D}{6} = 4.166\ (cm)$$

$$b = \frac{D}{2} = 12.5\ (cm)$$

$$i_t = 2{:}1\ (pendiente)$$

$$i_l = 1{:}3\ (pendiente)$$

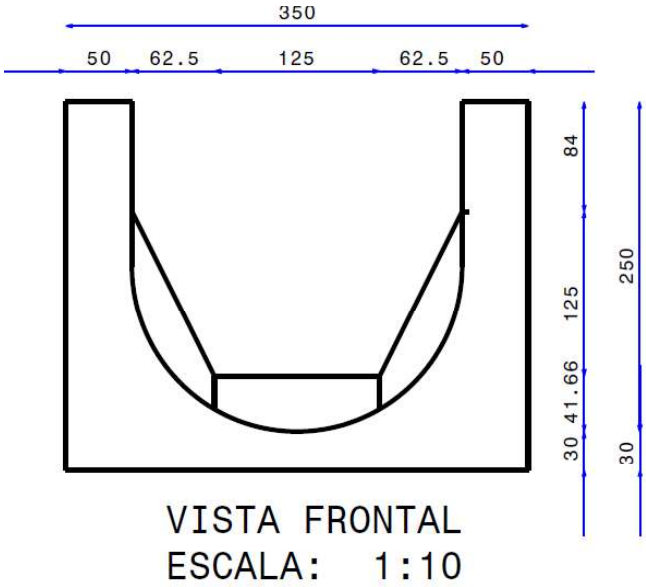
$$H = \frac{(B - b) \times i_t}{2} = 12.5\ (cm)$$

$$L = D = 25.0\ (cm)$$

$$L_q = L + \frac{2a}{i_l} = 50.0\ (cm)$$

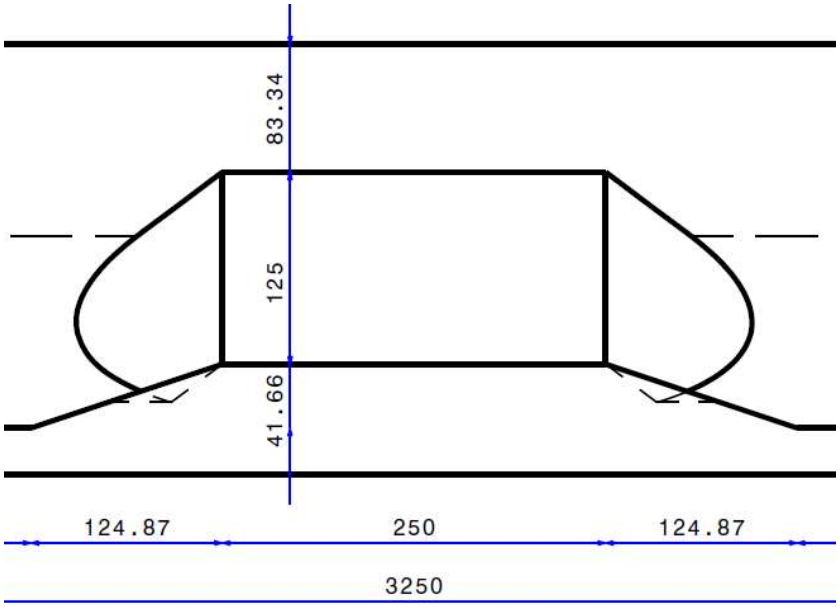
Con lo que se procedió a realizar la geometría.

FIGURA 4.16 DIMENSIONES DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS DE D=25 (CM) (CORTE)



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

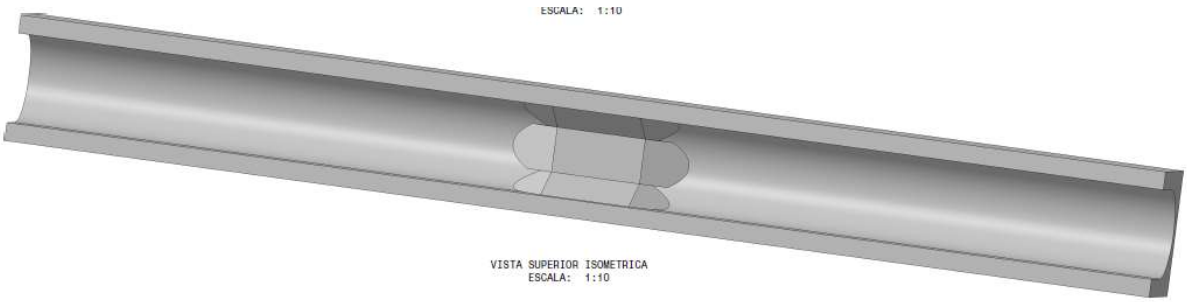
FIGURA 4.17 DIMENSIONES DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS DE D=25 (CM) (PERFIL)



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

Con esta información se realizó el modelo 3D del medidor y se presenta a continuación la renderización del mismo

FIGURA 4.18 MODELO 3D DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=25 CM



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

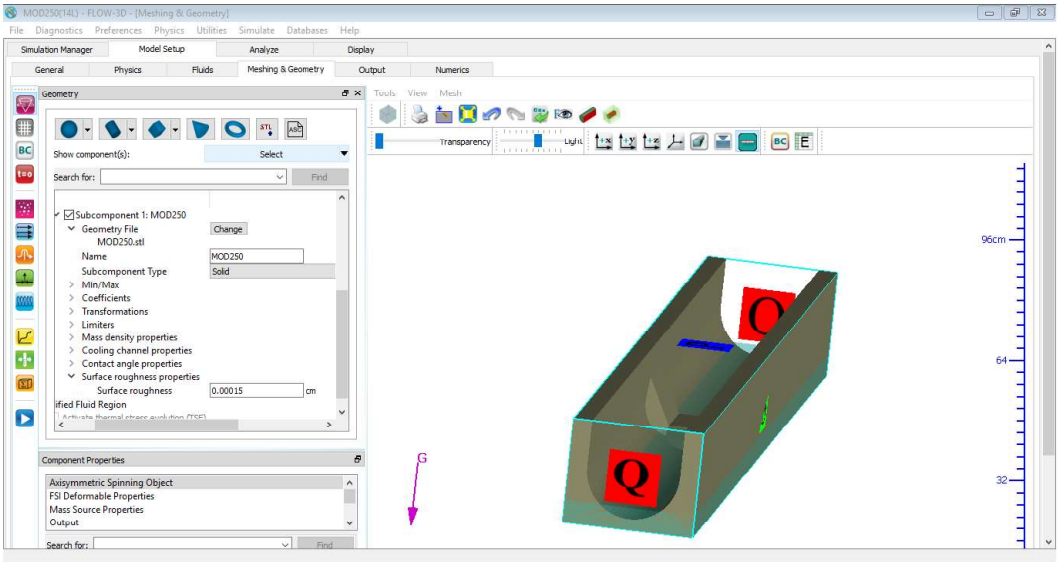
4.2.3.1 SIMULACIÓN MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=25 CM

Se realizarán 13 simulaciones cada una de las simulaciones cumplirá el apartado 3.2.1.4, a continuación, se presenta las capturas de pantalla de las 13 simulaciones.

La toma de datos se lo realizo a la longitud de D del inicio del medidor Palmer-Bowlus, por lo que se realizó a una longitud de 125 cm del inicio del modelo.

Se presenta a continuación la captura de pantalla de la geometría, ingreso de rugosidad, condiciones de borde y ejemplo de salida del programa.

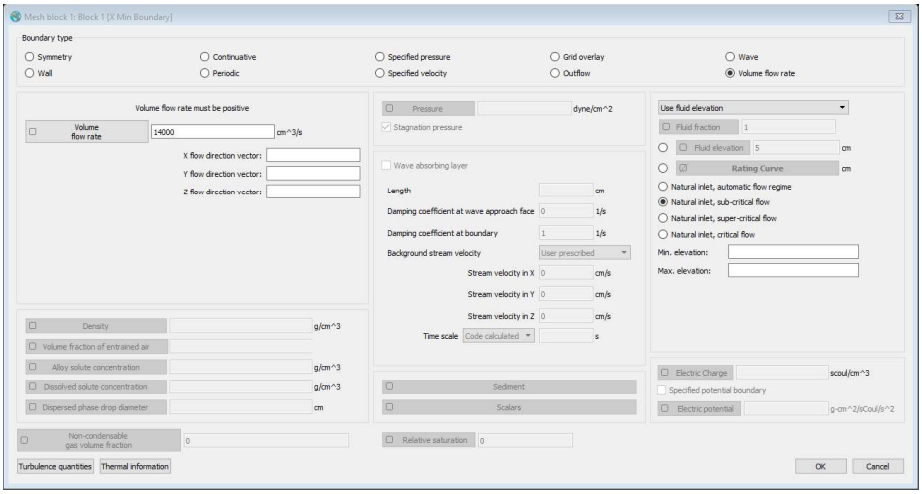
FIGURA 4.19 GEOMETRÍA E INGRESO DE RUGOSIDAD PALMER-BOWLUS D=25 CM



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

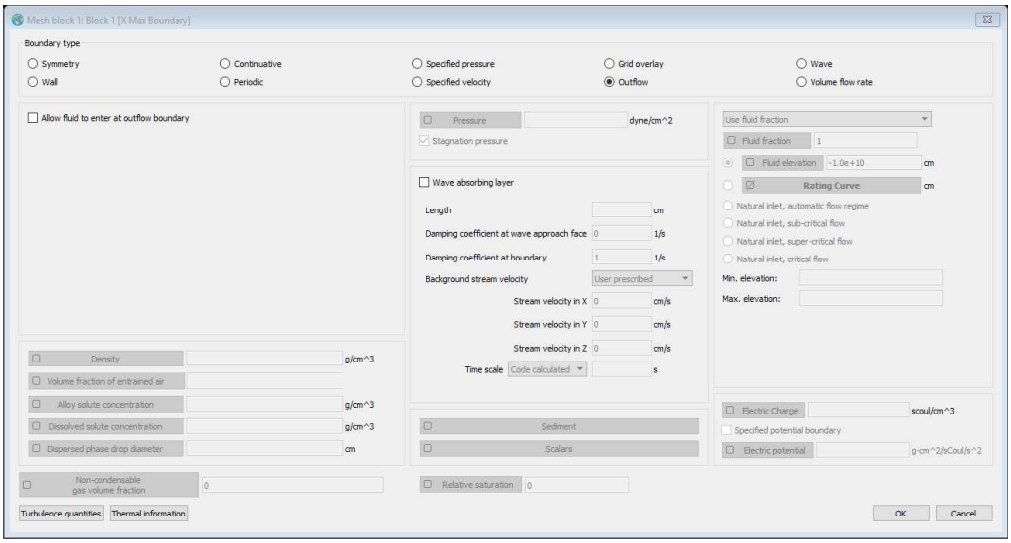
Se presenta a continuación un ejemplo de las condiciones de borde inicial y final del modelo.

FIGURA 4.20 CONDICIONES DE BORDE INICIAL PALMER-BOWLUS D=25 CM



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

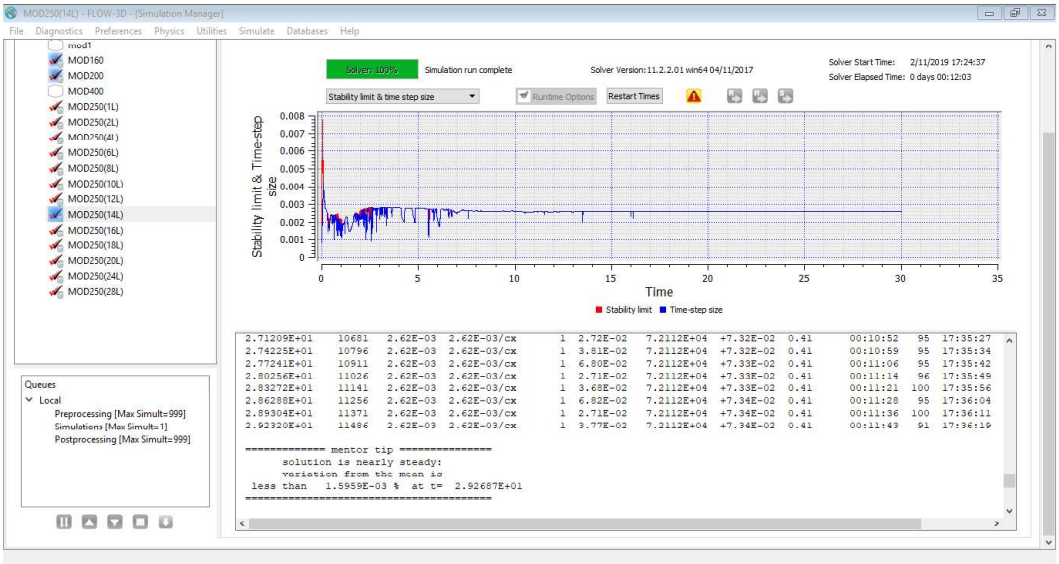
FIGURA 4.21 CONDICIONES DE BORDE FINAL PALMER-BOWLUS D=25 CM



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

Se presenta a continuación un ejemplo de pantalla de resultados de la modelación.

FIGURA 4.22 EJEMPLO PANTALLA DE RESULTADOS PARA EL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=25 CM



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

En el mismo se puede observar que el modelo se estabilizo y su funcionamiento es como flujo permanente, a continuación, se presenta el número de pruebas a ser simuladas que para el caso en estudio constituyen 13 simulaciones.

CUADRO 4.6 RESUMEN DE LOS CAUDALES SIMULADOS PARA EL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=25 CM

Prueba	Q
	(l/s)
1	1.00
2	2.00
3	4.00
4	6.00
5	8.00
6	10.00
7	12.00
8	14.00
9	16.00
10	18.00
11	20.00
12	24.00
13	28.00

ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

Una vez realizadas las modelaciones los resultados de las mismas se pueden observar en el ANEXO N# 4 por lo que se presenta a continuación el cuadro resumen.

CUADRO 4.7 RESUMEN DE LOS CALADOS SIMULADOS VS EL RESULTADO TEÓRICO PARA EL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=25 CM

Prueba	Q	ANALISIS DIMENSIONAL	SIMULACION	DIFERENCIA
	(l/s)	(cm)	(cm)	(%)
1	1.00	6.224	6.891	10.724
2	2.00	7.923	8.297	4.716
3	4.00	10.180	10.396	2.127
4	6.00	11.823	12.041	1.843
5	8.00	13.164	13.415	1.911
6	10.00	14.315	14.602	2.001
7	12.00	15.337	15.649	2.037
8	14.00	16.260	16.578	1.957
9	16.00	17.108	17.414	1.790
10	18.00	17.894	18.174	1.564
11	20.00	18.630	18.892	1.408
12	24.00	19.979	20.172	0.968
13	28.00	21.198	21.393	0.918
			PROMEDIO	**2.613**

ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

4.2.4 MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=40 CM

Con la metodología expuesta en el capítulo 3.1.1 se realiza el diseño geométrico del medidor Palmer-Bowlus a continuación.

Para el caso que D=40 cm se tiene que:

$$D = B = 40\ (cm)$$

$$a = \frac{D}{6} = 6.66\ (cm)$$

$$b = \frac{D}{2} = 20\ (cm)$$

$$i_t = 2{:}1\ (pendiente)$$

$$i_l = 1:3\ (pendiente)$$

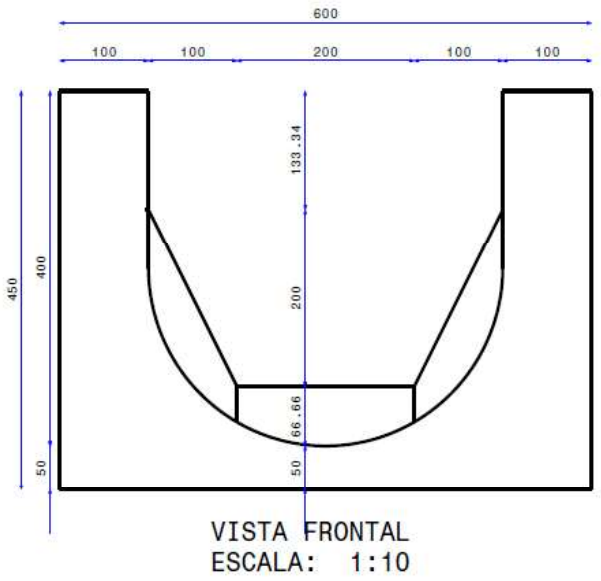
$$H = \frac{(B - b) \times i_t}{2} = 20\ (cm)$$

$$L = D = 40\ (cm)$$

$$L_q = L + \frac{2a}{i_l} = 80\ (cm)$$

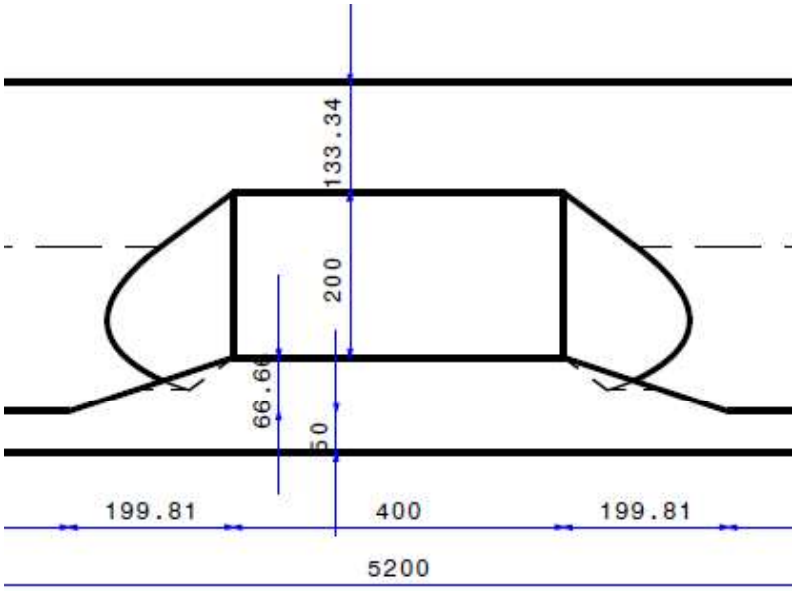
Con lo que se procedió a realizar la geometría del medidor.

FIGURA 4.23 DIMENSIONES DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS DE D=40 (CM) (CORTE)



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

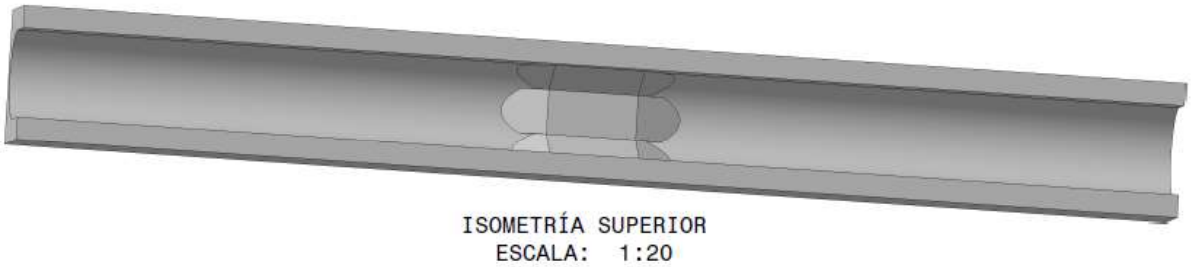
FIGURA 4.24 DIMENSIONES DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS DE D=40 (CM) (PERFIL)



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

Con esta información se realizó el modelo 3D del medidor y se presenta a continuación la renderización del mismo.

FIGURA 4.25 MODELO 3D DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=40 CM



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

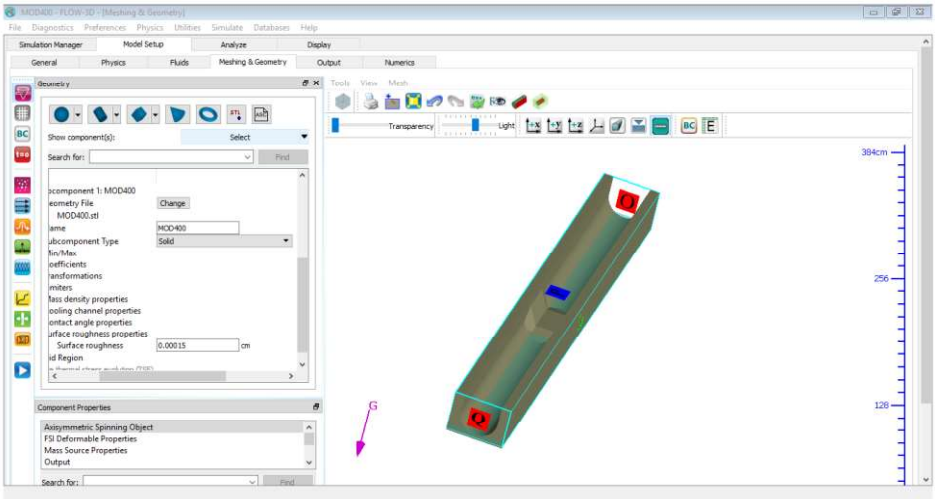
4.2.4.1 SIMULACIÓN MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=40 CM

Se realizarán 14 simulaciones cada una de las simulaciones cumplirá el apartado 3.2.1.4, se presenta las capturas de pantalla de las 14 simulaciones en el ANEXO N#5.

La toma de datos se lo realizo a la longitud de D del inicio del medidor Palmer-Bowlus, se obtuvo los datos a una longitud de 180 cm del inicio del modelo.

Se presenta a continuación la captura de pantalla de la geometría, ingreso de rugosidad, condiciones de borde y ejemplo de salida del programa.

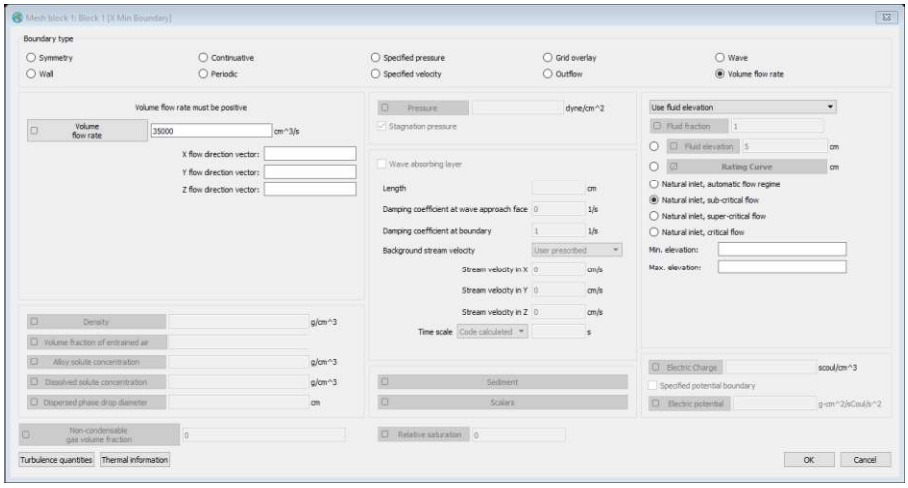
FIGURA 4.26 GEOMETRÍA E INGRESO DE RUGOSIDAD PALMER-BOWLUS D=40 CM



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

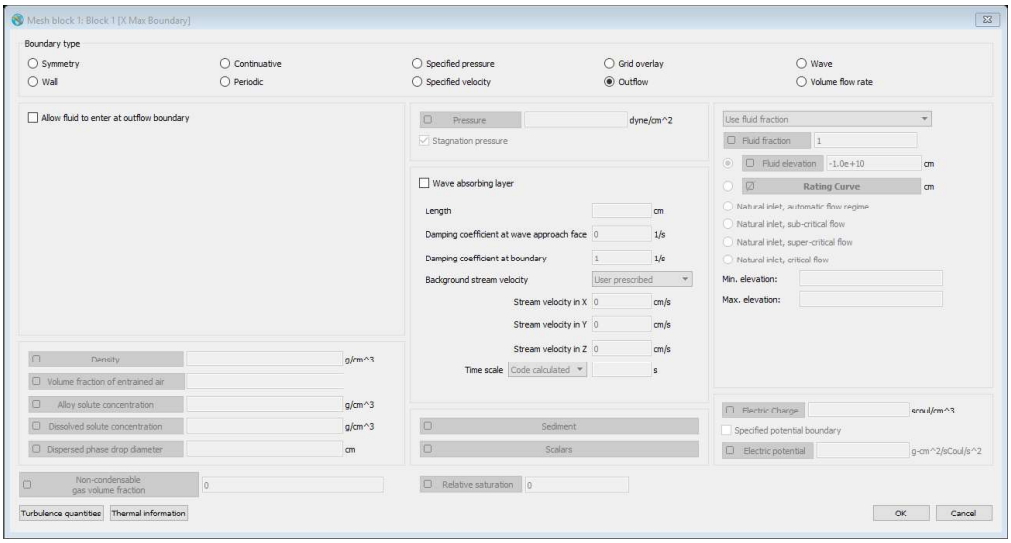
Se presenta a continuación un ejemplo de las condiciones de borde inicial y final del modelo.

FIGURA 4.27 CONDICIONES DE BORDE INICIAL PALMER-BOWLUS D=40 CM



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

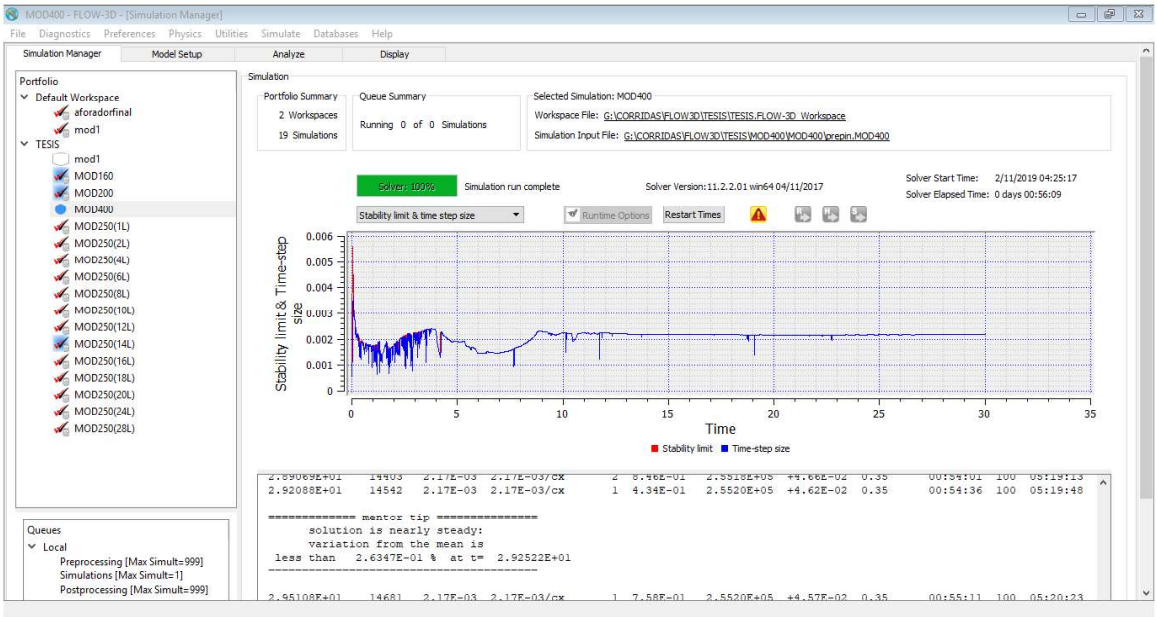
FIGURA 4.28 CONDICIONES DE BORDE FINAL PALMER-BOWLUS D=40 CM



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

Se presenta a continuación un ejemplo de pantalla de resultados de la modelación.

FIGURA 4.29 EJEMPLO PANTALLA DE RESULTADOS PARA EL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=40 CM



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

Se puede observar que el modelo se estabilizo y su funcionamiento es como flujo permanente, a continuación, se presenta el número de pruebas a ser simuladas que para el caso en estudio constituyen 14 simulaciones.

CUADRO 4.8 RESUMEN DE LOS CAUDALES SIMULADOS PARA EL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=20 CM

Prueba	Q
	(l/s)
1	2.50
2	5.00
3	10.00
4	15.00
5	20.00
6	25.00
7	30.00
8	35.00
9	40.00
10	45.00
11	50.00
12	55.00
13	60.00
14	70.00

ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

Una vez realizadas las modelaciones los resultados de las mismas se pueden observar en el ANEXO N# 5, por lo que se presenta a continuación el cuadro resumen.

CUADRO 4.9 RESUMEN DE LOS CALADOS SIMULADOS VS EL RESULTADO TEÓRICO PARA EL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=40 CM

Prueba	Q	ANALISIS DIMENSIONAL	SIMULACION	DIFERENCIA
	(l/s)	(cm)	(cm)	(%)
1	2.50	9.125	10.046	10.096
2	5.00	11.571	12.178	5.249
3	10.00	14.819	15.174	2.395
4	15.00	17.188	17.525	1.958
5	20.00	19.121	19.496	1.961
6	25.00	20.782	21.208	2.049
7	30.00	22.255	22.746	2.208
8	35.00	23.587	24.114	2.236
9	40.00	24.809	25.373	2.273
10	45.00	25.943	26.522	2.231
11	50.00	27.004	27.589	2.166
12	55.00	28.003	28.539	1.913
13	60.00	28.949	29.447	1.719
14	70.00	30.709	31.170	1.502
			PROMEDIO	**2.854**

ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

Como se observa en los cuadros 4.3, 4.5, 4.7 y 4.9, los resultados obtenidos en la modelación son muy cercanos a los obtenidos utilizando la ecuación obtenida por (Torres & Vásquez, 2010), siendo la diferencia entre el 1.036% hasta el 2.85%.

4.3 ANALISIS DE LOS RESULTADOS

El presente capítulo tiene como objetivo analizar la información obtenida, por lo que se partirá primero analizando que tan bien se ajusta la formula obtenida por (Torres & Vásquez, 2010), en relación a los resultados experimentales obtenidos en modelo.

Se presenta a continuación el cuadro resumen:

CUADRO 4.10 ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LABORATORIO VS LA APLICACIÓN DE LA FÓRMULA OBTENIDA POR (TORRES & VÁSQUEZ, 2010)

Prueba	Q	LABORATORIO	ANALISIS DIMENSIONAL	DIFERENCIA
	(L/s)	(cm)	(cm)	(%)
1	3.683	10.097	10.1536	0.560
2	6.052	12.145	12.1319	0.108
3	9.359	14.280	14.2288	0.359
4	12.705	15.995	15.9355	0.372
5	15.780	17.335	17.2794	0.320
6	18.663	18.452	18.4035	0.263
7	22.047	19.627	19.5974	0.151
8	24.818	20.508	20.4956	0.060
9	27.740	21.375	21.3799	0.023
10	30.003	22.007	22.0274	0.093
11	36.577	23.688	23.7559	0.287
12	40.180	24.528	24.6249	0.395
			PROMEDIO	**0.249**

FUENTE: Silva Roberto, 2019

Como se puede observar en el cuadro 4.10 la diferencia promedio entre los datos obtenidos en laboratorio y los calculados es de 0.249%, esto se debe a que para

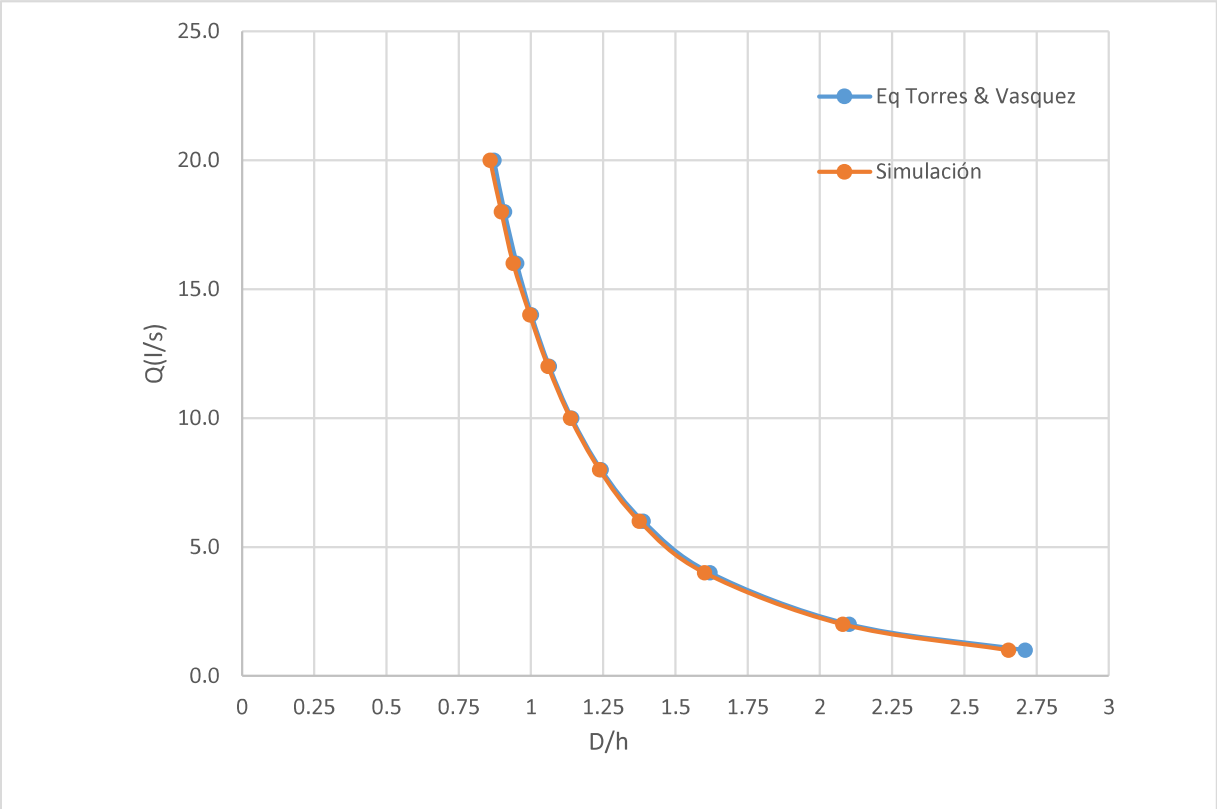
obtener los coeficientes de descarga se utilizaron los datos experimentales obtenidos en el laboratorio, sin embargo, cabe recalcar que incluso aquí se observa una diferencia entre los valores obtenidos por medio de la EQ. 27 y lo obtenido en el modelo experimental.

Siguiendo el análisis entre los datos obtenidos en el modelo físico y el primer modelo que sirvió como punto de partida de este trabajo se encontró que la diferencia promedio entre los datos obtenidos mediante la simulación y los de laboratorio es 2.345% (cuadro 3.5), además se pudo observar en la figura 3.31 que los resultados de la modelación numérica se ajustan a los obtenidos experimentalmente, lo que nos lleva a exponer las curvas de descarga obtenidas para los medidores de caudal Palmer-Bowlus de diámetros D=16cm, D=20cm, D=25cm y D=40cm a continuación.

4.3.1 CURVA DE DESCARGA MEDIDOR PALMER BOWLUS D=16CM

En base a los resultados obtenidos en el capítulo 4.2.1, y específicamente en la tabla de resultados 4.3 se graficó la curva de descarga y se la presenta a continuación.

FIGURA 4.30 CURVA DE DESCARGA MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=16 CM



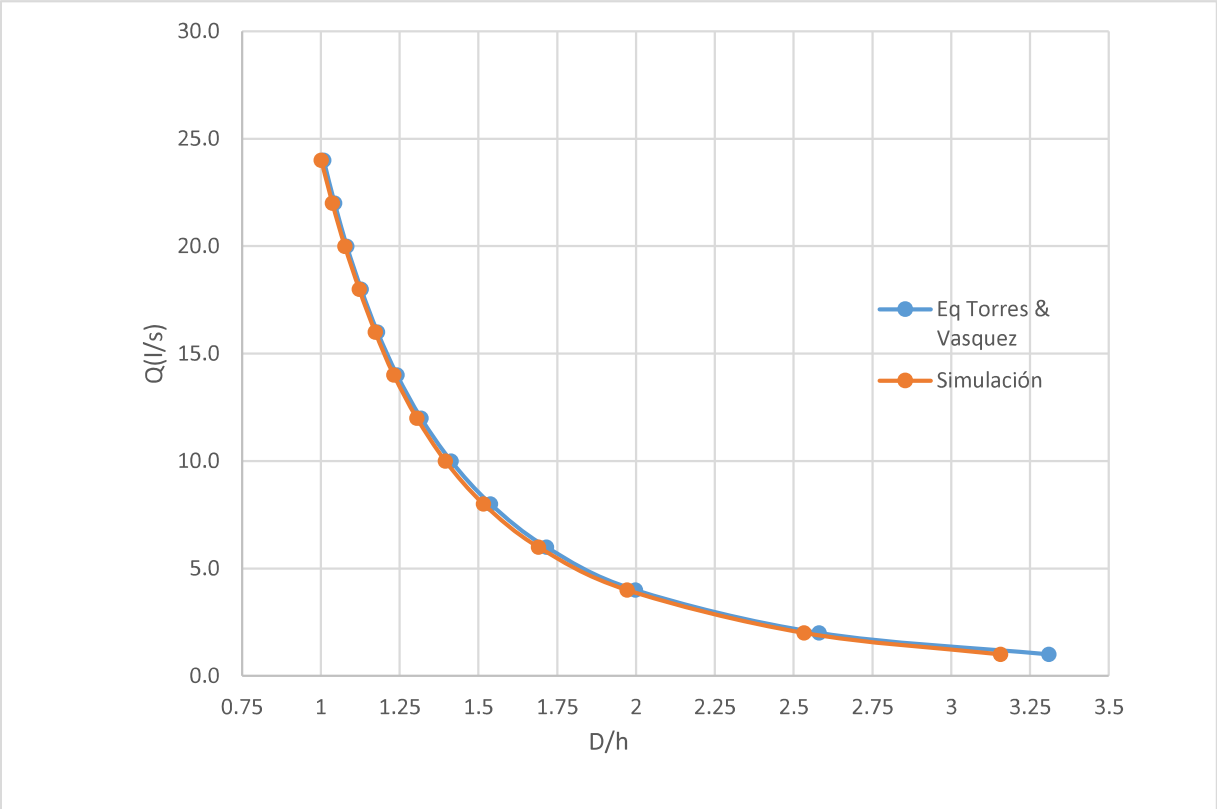
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

Como se puede observar el los resultados obtenidos en el modelo numérico y los resultados de la EQ. 27 tienen excelente aproximación la diferencia promedio entre ambos es de 1.036% que en la realidad son diferencias de calados en la ubicación de medición, para caudales bajos menores a 1 mm y para caudales altos diferencias menores a 2.5 mm, esto en la práctica concluye, que utilizar cualquiera de las curvas obtenida por medio de la EQ. 27 o la curva de descarga obtenida por la simulación es equivalente.

4.3.2 CURVA DE DESCARGA MEDIDOR PALMER BOWLUS D=20CM

En base a los resultados obtenidos en el capítulo 4.2.2, y específicamente en la tabla de resultados 4.5 se graficó la curva de descarga y se la presenta a continuación.

FIGURA 4.31 CURVA DE DESCARGA MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=20 CM



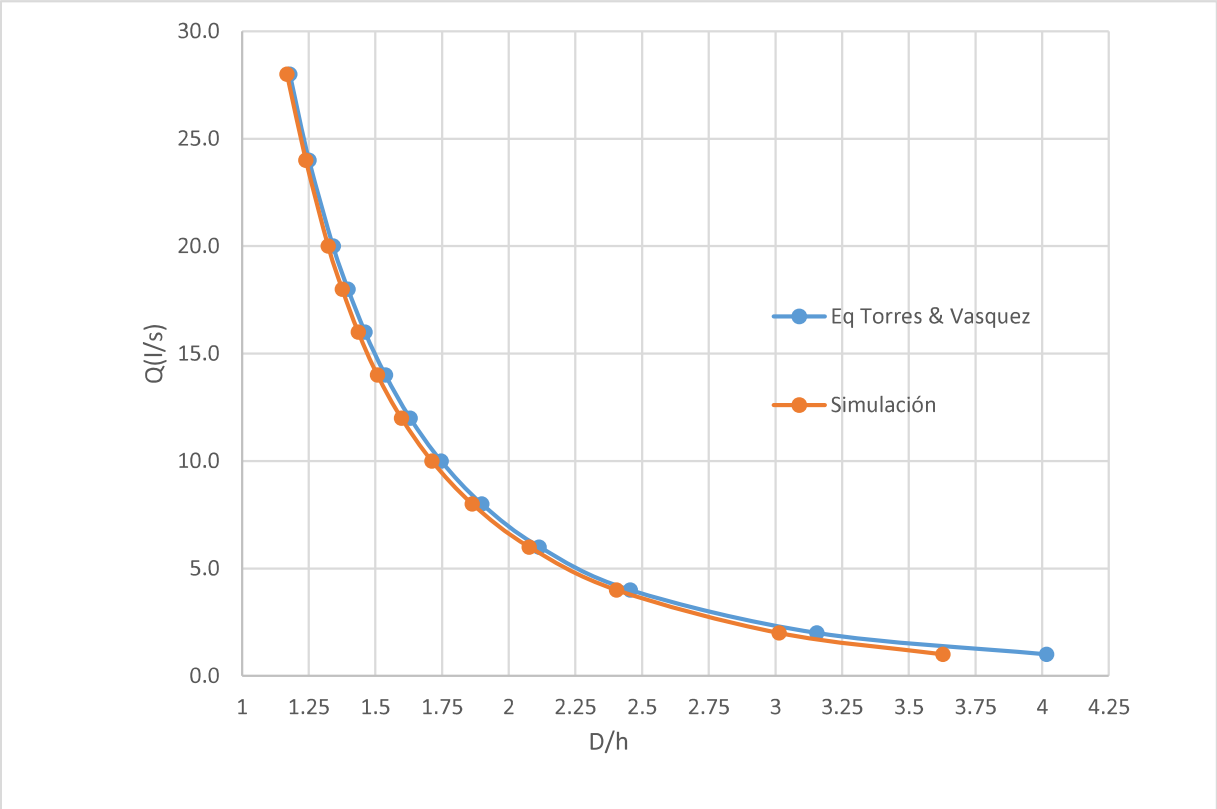
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

Los resultados obtenidos en el modelo numérico y los resultados de la EQ. 27 tienen excelente aproximación la diferencia promedio entre ambos es de 1.332%, para caudales bajos menores a 2.0 mm (se excluye de esta regla el caudal más bajo pues presenta una diferencia de 2.92 mm) y para caudales altos diferencias menores a 1.5 mm, por lo que en la práctica pueden ser utilizadas ambas.

4.3.3 CURVA DE DESCARGA MEDIDOR PALMER BOWLUS D=25CM

En base a los resultados obtenidos en el capítulo 4.2.3, y específicamente en la tabla de resultados 4.7 se graficó la curva de descarga y se la presenta a continuación.

FIGURA 4.32 CURVA DE DESCARGA MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=25 CM



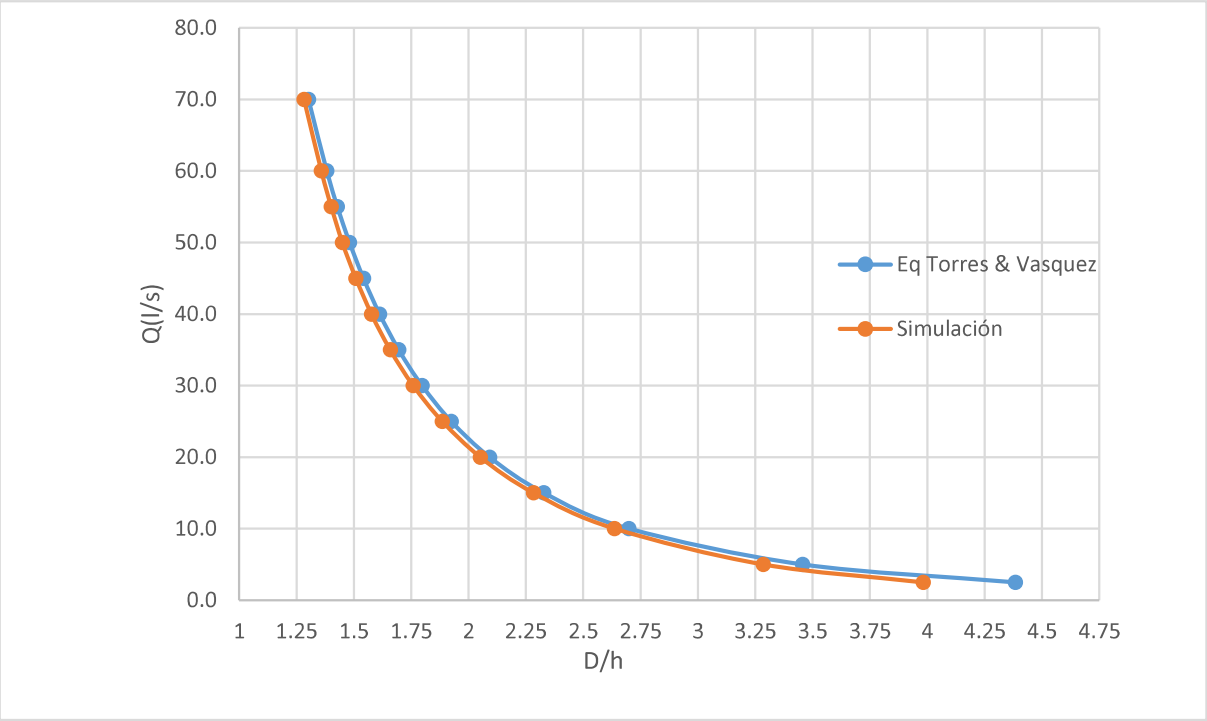
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

Como se puede observar el los resultados obtenidos en el modelo numérico y los resultados de la EQ. 27 tienen excelente aproximación la diferencia promedio entre ambos es de 2.613%, la diferencia para caudales bajos menores a 3.5 mm (se excluye de esta regla el caudal más bajo pues presenta una diferencia de 6.6 mm) y para caudales altos diferencias menores a 3.0 mm, como se puede observar en caudales mayores a 5 $\left(\frac{l}{s}\right)$ usar cualquiera de ellas es acertado.

4.3.4 CURVA DE DESCARGA MEDIDOR PALMER BOWLUS D=40CM

En base a los resultados obtenidos en el capítulo 4.2.4, y específicamente en la tabla de resultados 4.9 se graficó la curva de descarga y se la presenta a continuación.

FIGURA 4.33 CURVA DE DESCARGA MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=40 CM



ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

Los resultados obtenidos en el modelo numérico y los resultados de la EQ. 27 tienen excelente aproximación la diferencia promedio entre ambos es de 2.854%, esto se es diferencias de calados en la ubicación de medición, para caudales bajos menores a 3.5 mm (se excluye de esta regla el caudal más bajo pues presenta una diferencia de 9.2 mm) y para caudales altos diferencias menores a 2.5 mm, como se puede observar en caudales mayores a 5 $\left(\frac{l}{s}\right)$ usar cualquiera de ellas es acertado.

CAPÍTULO 5.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

La modelación numérica es una herramienta válida para el diseño se comprobó en este proyecto que la mayoría de simulaciones tenían una diferencia menor al 2% con respecto a su contraparte teórica o experimental, por lo que es factible concluir que la modelación CFD presenta resultados confiables que pueden ser utilizados en la etapa de diseño y operación de un medidor tipo Palmer-Bowlus.

En este trabajo se demostró que para caudales superiores a 5.0 $\left(\frac{l}{s}\right)$ utilizar la fórmula propuesta por (Torres & Vásquez, 2010) es válida, los resultados son muy cercanos a los obtenidos en este estudio por medio de la modelación CFD utilizando el programa Flow-3D.

Como resultado de este estudio se presentó las curvas de descarga de los medidores Palmer-Bowlus para cuatro diámetros D=16 cm, D=20 cm, D=25 cm y D=40 cm, estos diámetros son los más utilizados en los sistemas de alcantarillado del DMQ.

Producto de este estudio se demostró que la diferencia entre la fórmula propuesta por (Torres & Vásquez, 2010) y los resultados encontrados en los diferentes modelos realizados en Flow-3D fueron para el medidor Palmer-Bowlus de D=16 cm la diferencia promedio fue 1.0%, para el medidor Palmer-Bowlus de D=20 cm la diferencia promedio fue 1.3%, para el medidor Palmer-Bowlus de D=16 cm la diferencia promedio fue 2.6% (aquí el caudal que causa este incremento en el promedio de la diferencia es el caudal $1\left(\frac{l}{s}\right)$, esto será ampliado en el apartado 5.2 Recomendaciones y 5.3 Trabajos Futuros.) si se excluye los caudales inferiores a $2\left(\frac{l}{s}\right)$, la diferencia promedio es 1.7%, y para el medidor Palmer-Bowlus de D=40 cm la diferencia promedio fue 2.9% teniendo el mismo inconveniente que la anterior donde para caudales pequeños se tiene una diferencia mucho mayor a las otras modelaciones, sin embargo inclusive tomando en

cuenta todas estas se tiene que para el peor caso la diferencia promedio es de 2.9% que es inferior a la aceptada como válida que es 10% según (Casa, 2016).

Del resultado de la calibración del modelo se puede concluir que los modelos de turbulencia se ajustan muy bien entre ellos, con lo que escoger el modelo RNG para simular este tipo de flujos es correcto con lo cual también se hace válida la conclusión obtenida por (Casa, 2016), esto se debe a que los modelos de turbulencia RNG y $\kappa - \varepsilon$ son parecidos debido a que usan ecuaciones similares, la diferencia radica en el valor de las constantes de cada modelo (Flow Science, Inc., 2016).

Se estudio también el efecto de la rugosidad del material en la entrega de resultados y producto de este estudio se concluye que la rugosidad en este tipo de simulación no tiene mayor influencia, por lo que utilizar la recomendada en los textos es correcta.

El tamaño de la celda fue estudiado en la etapa de calibración y se concluyo que tener un tamaño de celda igual a 1 cm, es adecuado para este tipo de modelaciones, el uso del computador en horas se septuplica si se disminuye este tamaño de celda a 0.5 cm y la diferencia entre los resultados es despreciable.

5.2 RECOMENDACIONES

Debido a la escasa cantidad de pruebas experimentales menores a $5.0\left(\frac{l}{s}\right)$ (solamente se cuenta con una prueba experimental), es complicado saber si la ecuación planteada por (Torres & Vásquez, 2010) en este rango (entre 0 $\left(\frac{l}{s}\right)$ y $5\left(\frac{l}{s}\right)$) refleja correctamente la realidad, por lo que sería conveniente realizar más pruebas en este rango para comprobar si el coeficiente de descarga calculado por los autores antes mencionados es correcto o se lo puede ajustar de mejor manera.

El programa Flow-3D es una herramienta muy potente, sin embargo hay que tener en cuenta la capacidad del ordenador, el grado de exactitud que deseemos conseguir, y el fenómeno hidráulico que se va a modelar para con seguridad poder escoger el tipo de modelo que vamos a realizar, las condiciones de borde a introducir, el tiempo de modelado, y el tamaño de malla, estas son las cuestiones principales que pueden demandar horas, días, semanas y hasta meses en realizar una corrida, por lo que es

necesario tener bien claro los parámetros mencionados para no mal gastar la capacidad computacional de los ordenadores actuales, el presente trabajo demando para cada modelación entre 30 a 120 minutos, siendo la modelación del medidor Palmer-Bowlus D=40 cm la que demando mayor cantidad de escenarios (14 modelaciones individuales) con una duración individual de 120 minutos, que nos da como resultado para poder obtener la curva de descarga fueron necesarias 28 horas de uso computacional, tomando en cuenta que para realizar este trabajo se contó con un Computador AMD RYZEN 7 1700 (16 núcleos trabajando a 3.9 Ghz todo el tiempo), 32 Gb de RAM con una velocidad de 3000 Mhz y un disco duro de capacidad igual a 2 TB para poder almacenar los archivos de resultados.

En el presente trabajo se hizo evidente que si bien el Flow-3D permite el ingresar la geometría 3D en el mismo programa, realizar aquí una geometría como la de un medidor Palmer-Bowlus es muy complejo, por lo que, para la realización de las geometrías expuestas en este proyecto, se utilizó la ayuda del software CATIA V5, que es una potente herramienta de dibujo, llegando a ser más potente que el mismo AUTOCAD tan usado en nuestro medio.

En el presente proyecto se obtuvieron las curvas de descarga tomando en cuenta la modelación CFD y estos fueron comparados versus los resultados de la ecuación propuesta por (Torres & Vásquez, 2010), para terminar de validar los mismos se podría construir un aforador Palmer-Bowlus escogiendo un diámetro aquí presentado y experimentalmente validar tanto la ecuación antes mencionada y las curvas de descarga que se presentan en este trabajo, este podría servir como un tema de tesis adicional.

5.3 TRABAJOS FUTUROS

Para poder validar tanto las curvas de descarga obtenidas en este proyecto, como así también la ecuación teórica experimental encontrada por (Torres & Vásquez, 2010), será necesario construir un medidor Palmer-Bowlus de uno de los cuatro diámetros estudiados en esta tesis de preferencia el D=40 cm (porque aquí se encuentran las mayores diferencias entre la fórmula propuesta por (Torres & Vásquez, 2010) y el

modelo numérico), este trabajo servirá para afinar los coeficientes de descarga de la ecuación antes descrita y ayudaría al modelo en el estudio de los caudales menores a 5 $\left(\frac{l}{s}\right)$ donde se encuentra la mayor disparidad de resultados, cabe indicar que incluso con esta disparidad como se puede observar tanto en los anexos N#1 al N#5 como en las curvas presentadas al final del capítulo 5, la aproximación entre ambos acercamientos es muy buena en el peor de los casos 2.9% y en mejor 1.0%.

Bibliografía

Aulestia, C. (2017). *Modelación numérica en tres dimensiones de flujo en las compuertas de la captación del Proyecto Toachi - Pilatón aplicando dinámica de fluidos computacional (CFD).* Quito: Escuela Politécnica Nacional.

Casa, E. (2016). *Modelación numérica del flujo rasante en una rápida escalonada aplicando la dinámica de fluidos computacional (CFD) Programa FLOW-3D.* Quito: Escuela Politécnica Nacional.

Chow, V. T. (2004). *Hidráulica de canales abiertos* (Primera ed.). (J. Saldarriaga, Trad.) Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.

Domínguez, F. (1999). *Hidráulica* (Sexta Edición ed.). Santiango de Chile, Chile: Editorial Universitaria.

Fernández, J. (2012). *Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos.* Barcelona: Editorial Reverté, S.A.

Flow Science, Inc. (2016). *Flow-3D v11.2 Documentation.* Flow Science, Inc. Santa Fe: Flow Science.

Ludwig, J., & Ludwig, R. (1951). Design of Palmer-Bowlus Flumes. *Sewafe and Insdustrial Wastes, 23*(9), 1096-1107. Obtenido de https://www.jstor.org/stable/25031687

Sotelo, G. (1997). *Hidráulica General Volumen 1.* Mexico D.F.: Limusa S.A.

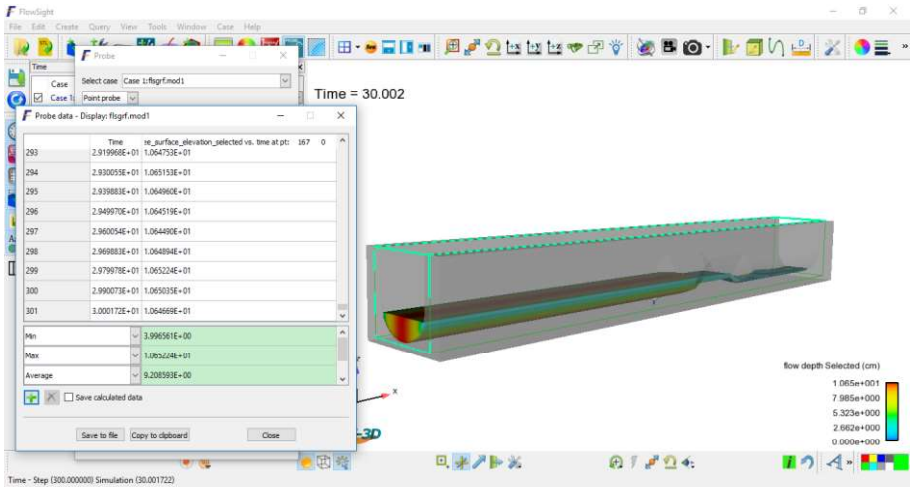
Torres, C., & Vásquez, E. (2010). *Análisis de medidores de caudal para flujo subcrítico en sistemas de alcantarillado.* Quito: Escuela Politécnica Nacional.

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to computational fluid dynamics - The finite volume method.* New York: John Wiley & Sons.

ANEXOS

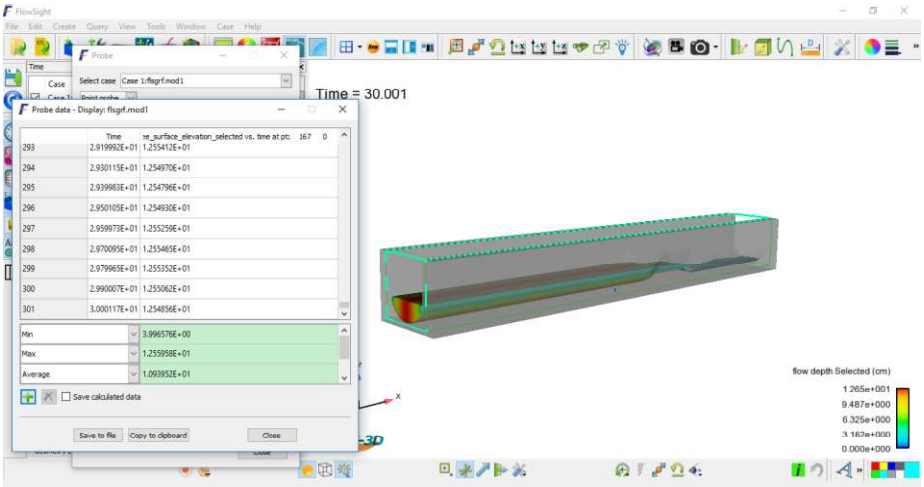
ANEXO N# 1 - RESULTADOS DE LA MODELACIÓN DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=33 CM

MODELACIÓN Q=3.683$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=10.64 (cm)



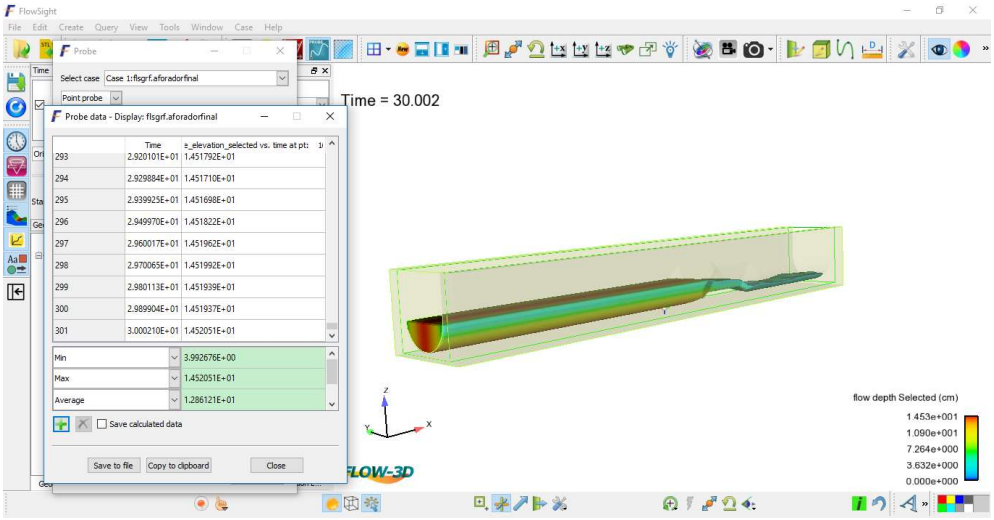
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

MODELACIÓN Q=6.052$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=12.548 (cm)



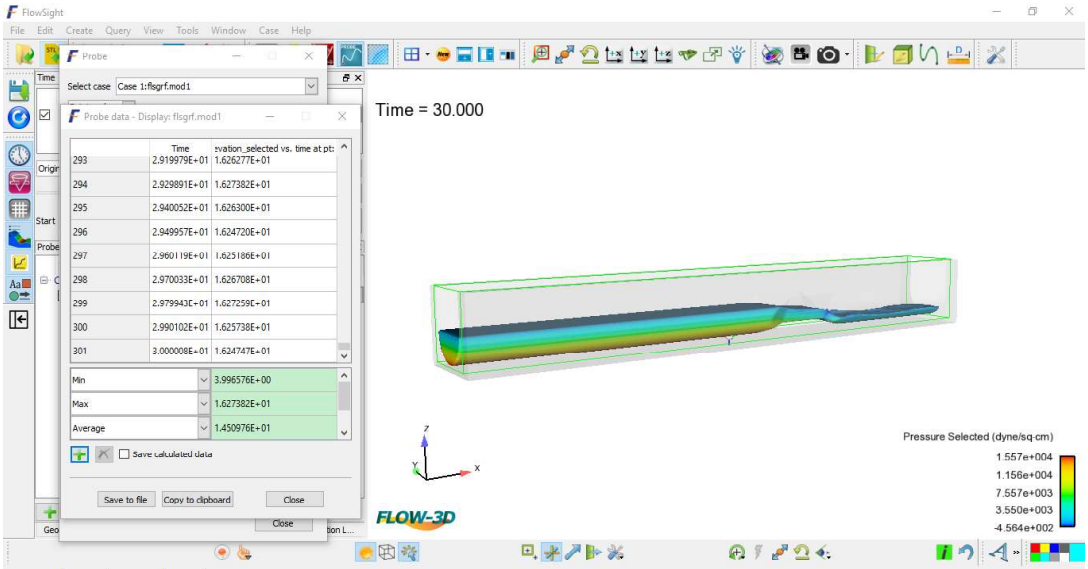
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

MODELACIÓN Q=9.359$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=14.520 (cm)



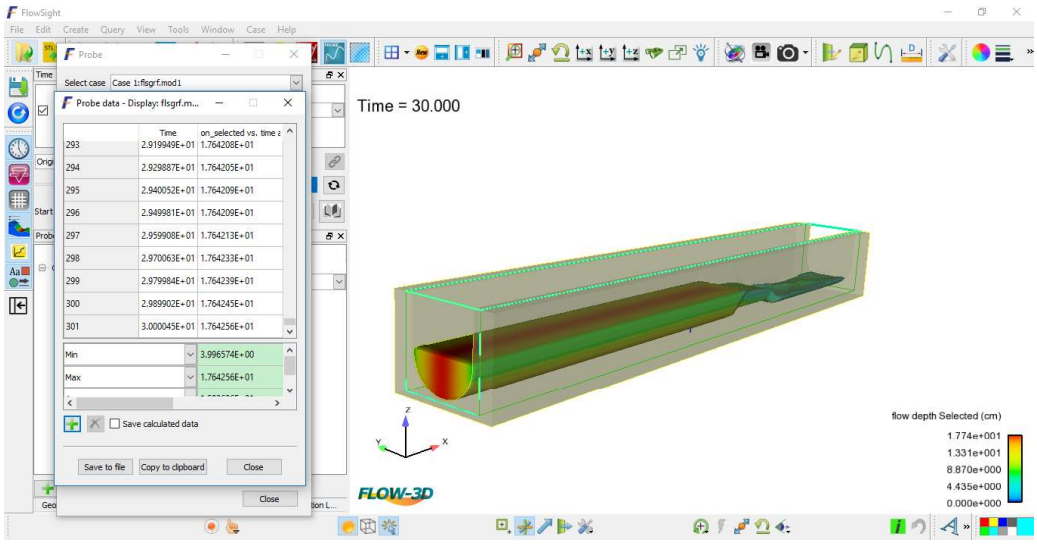
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

MODELACIÓN Q=12.705$\left(\frac{l}{s}\right)$, H= 16.247(cm)



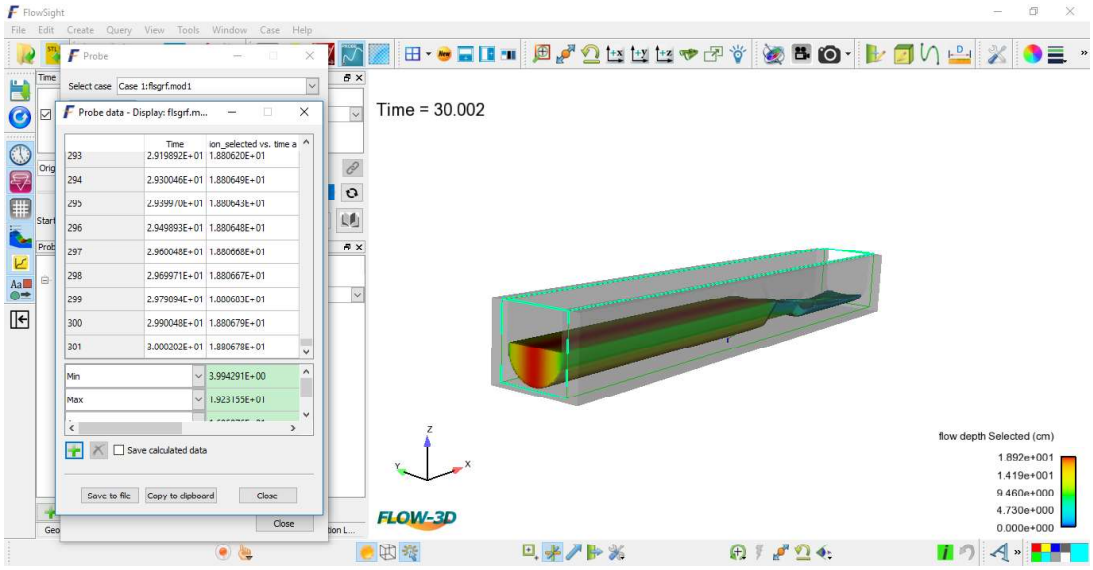
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

MODELACIÓN Q=15.780$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=17.642 (cm)



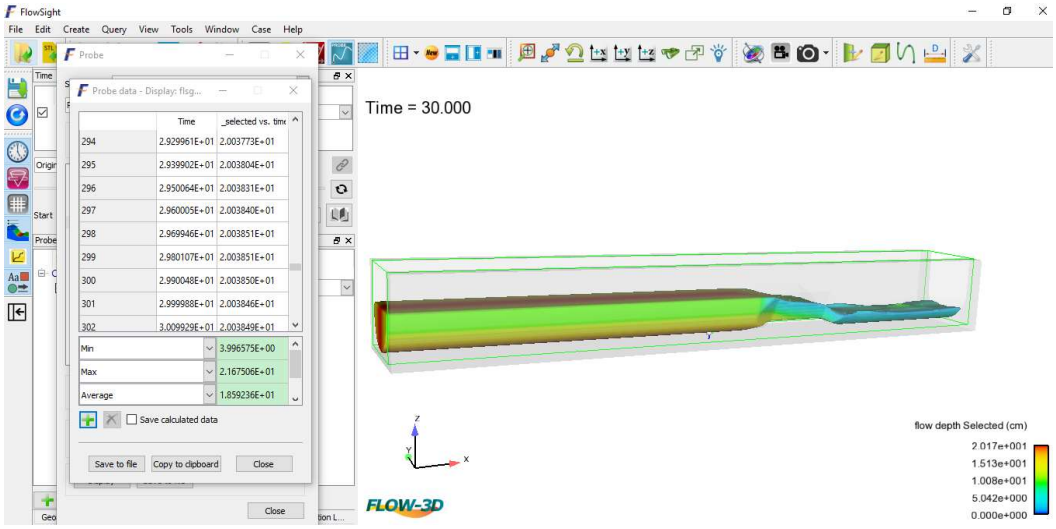
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

MODELACIÓN Q=18.663$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=18.806 (cm)



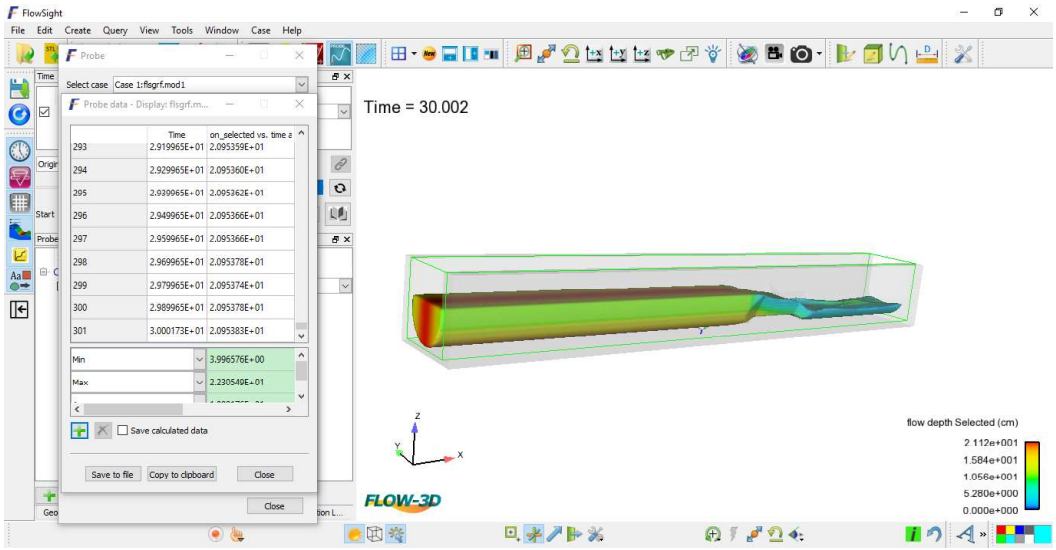
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

MODELACIÓN Q=22.047$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=20.038 (cm)



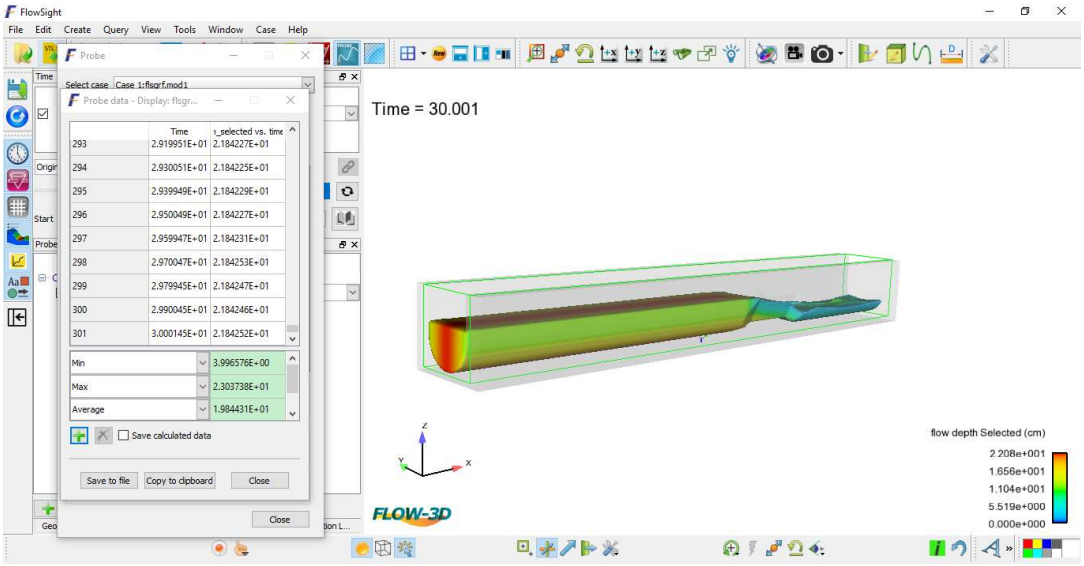
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

MODELACIÓN Q=24.818$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=20.953 (cm)



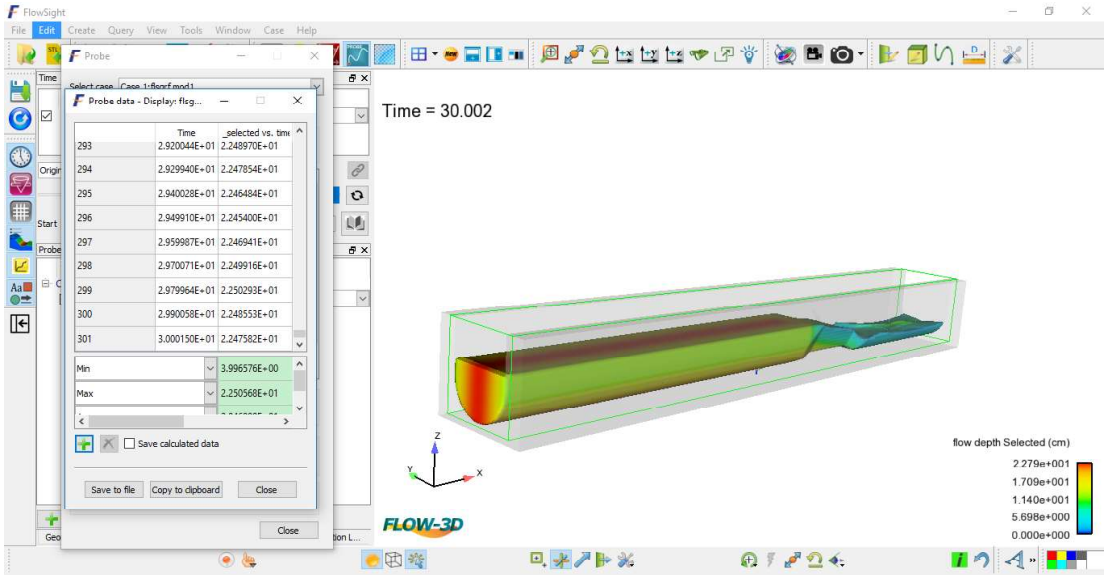
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

MODELACIÓN Q=27.740$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=21.842 (cm)



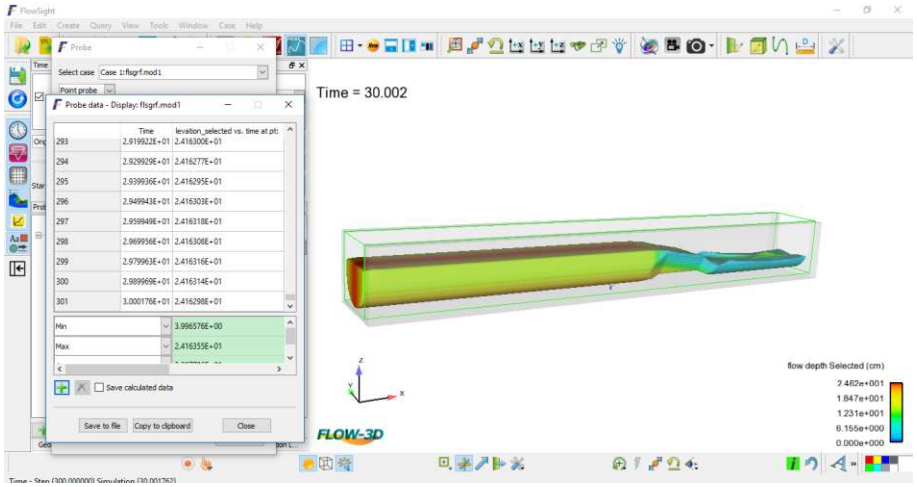
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

MODELACIÓN Q=30.003$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=22.475 (cm)



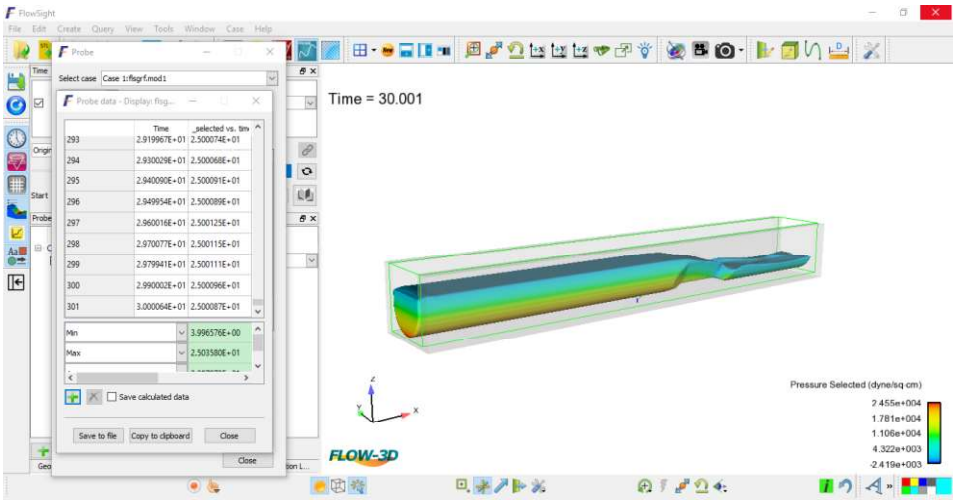
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

MODELACIÓN Q=36.577$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=24.162 (cm)



FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

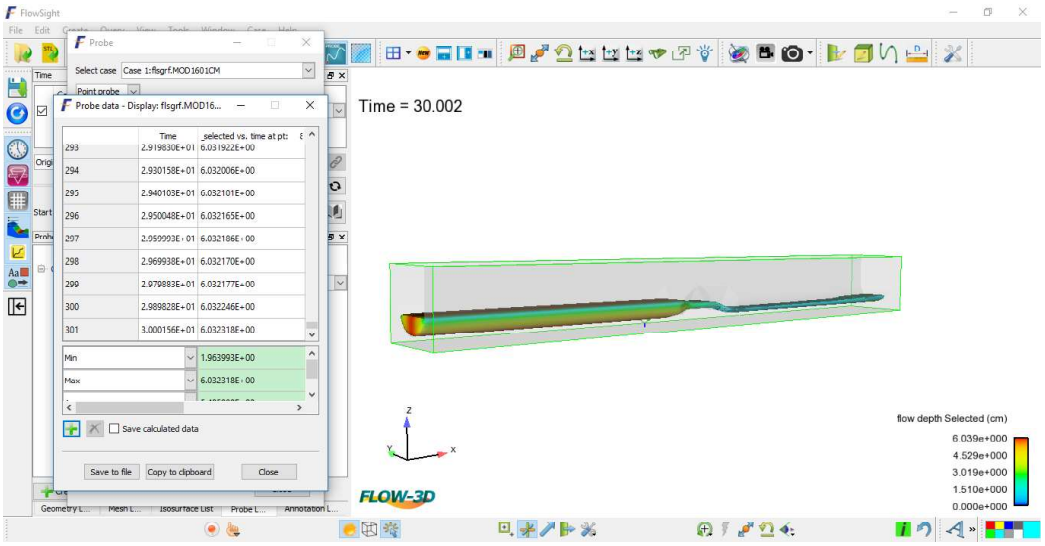
MODELACIÓN Q=40.180$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=25.00 (cm)



FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

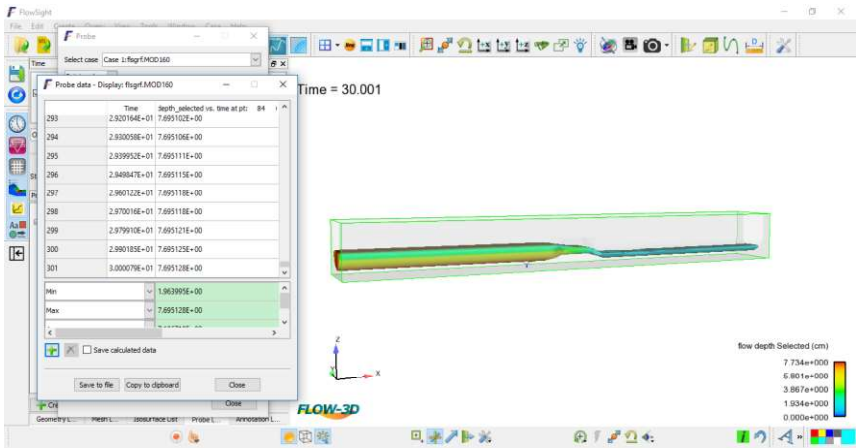
ANEXO N# 2 - RESULTADOS DE LA MODELACIÓN DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=16 CM

MODELACIÓN Q=1.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=6.032 (cm)



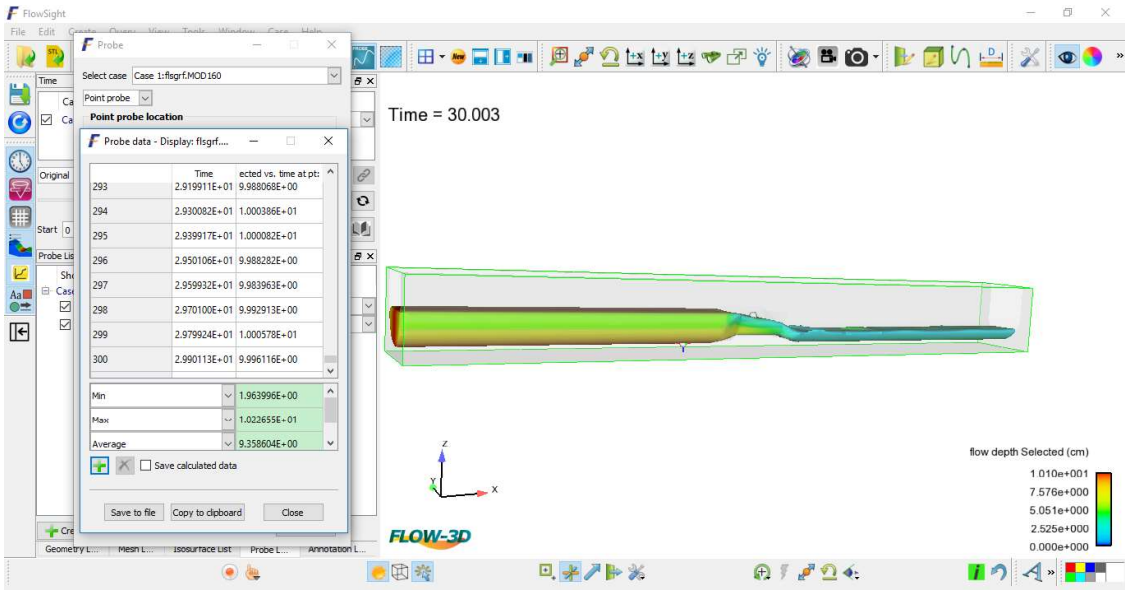
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

MODELACIÓN Q=2.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=7.695 (cm)



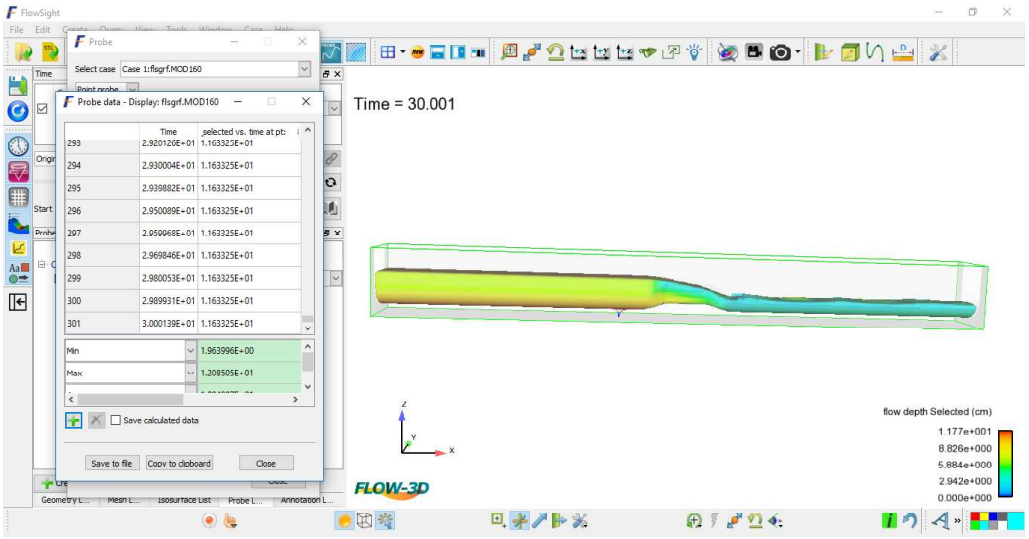
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

MODELACIÓN Q=4.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=9.996 (cm)



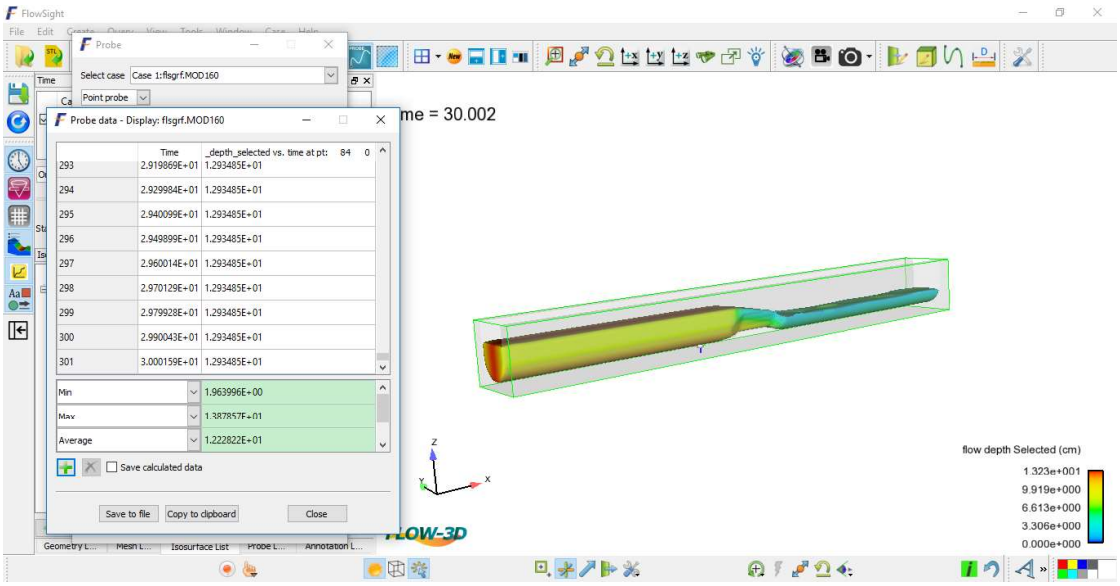
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

MODELACIÓN Q=6.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=11.633 (cm)



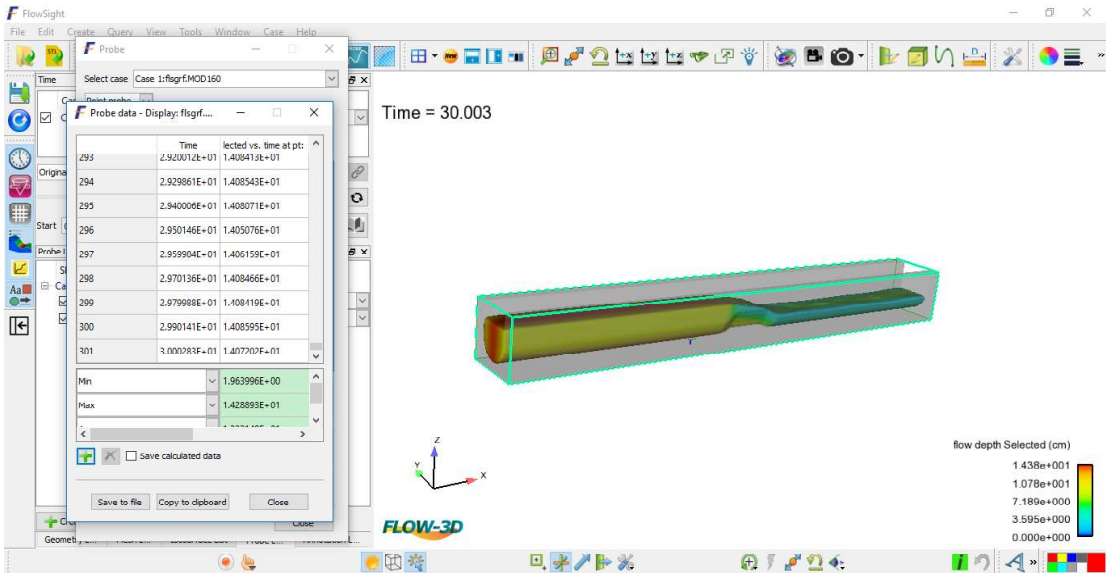
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

MODELACIÓN Q=8.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=12.934 (cm)



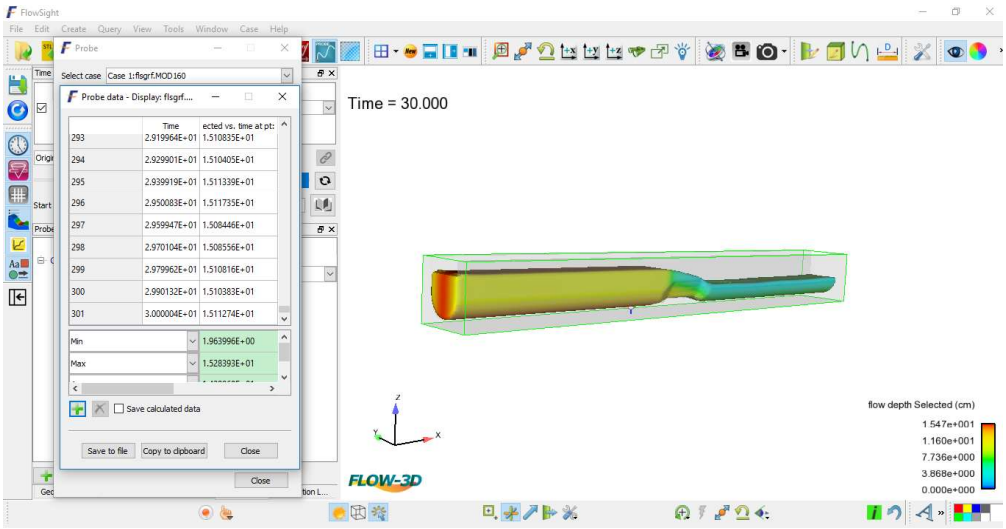
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

MODELACIÓN Q=10.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=14.072 (cm)



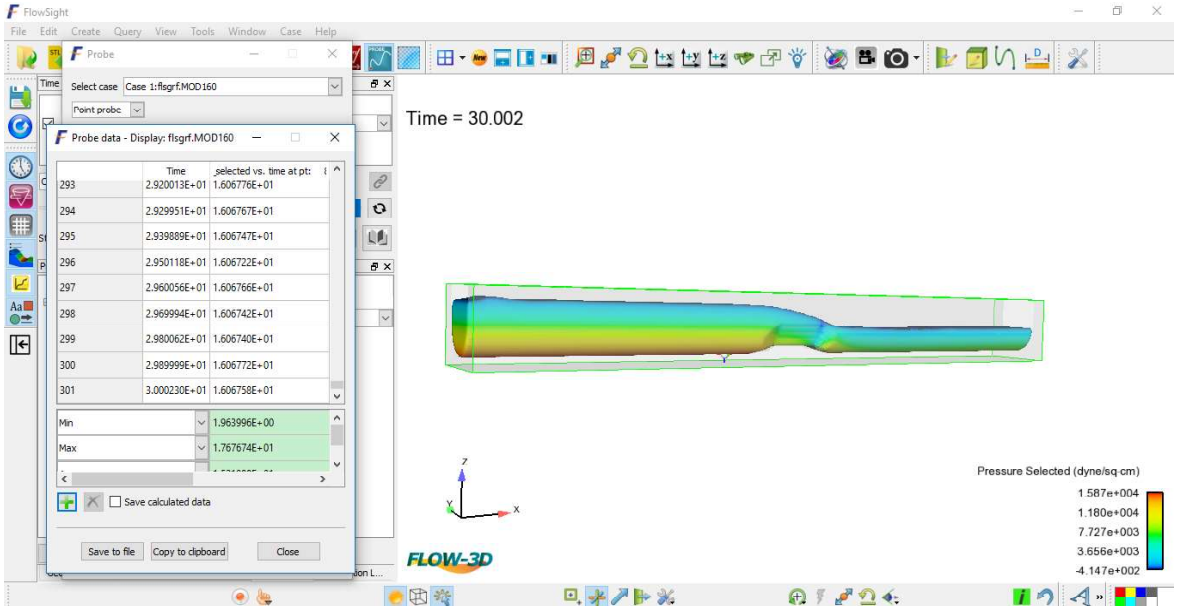
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

MODELACIÓN Q=12.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=15.112 (cm)



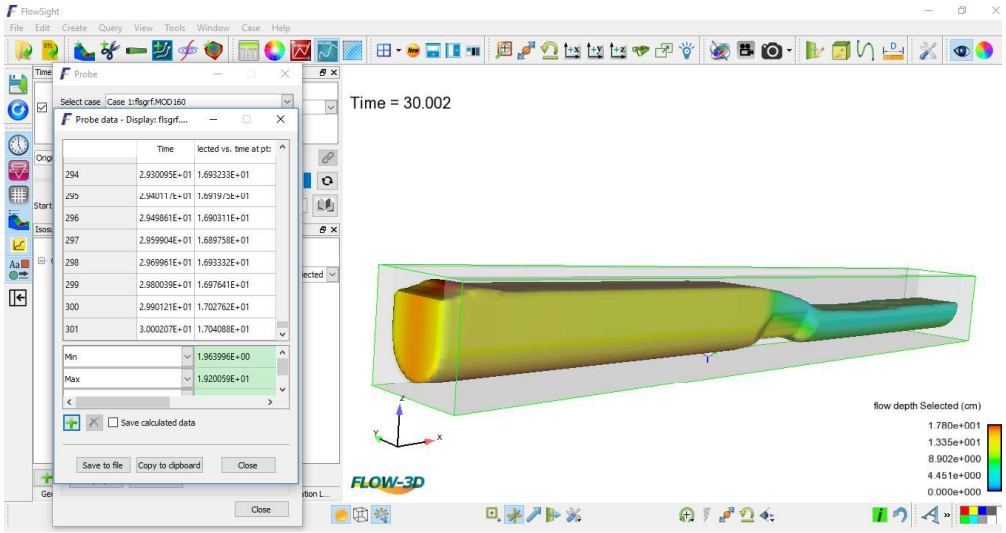
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

MODELACIÓN Q=14.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=16.067 (cm)



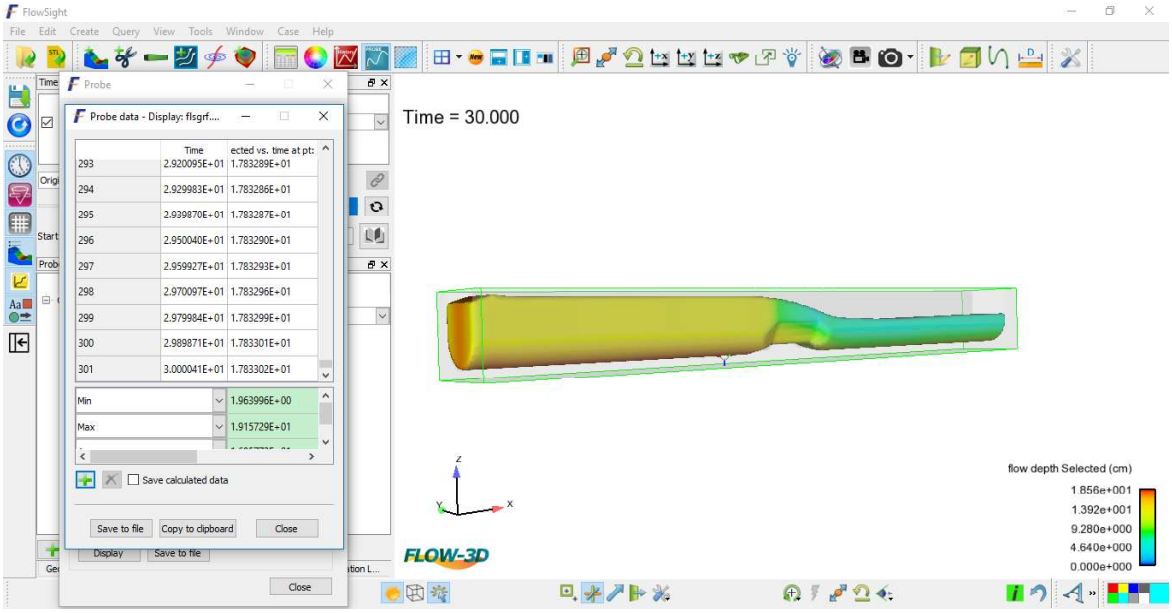
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

MODELACIÓN Q=16.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=17.040 (cm)



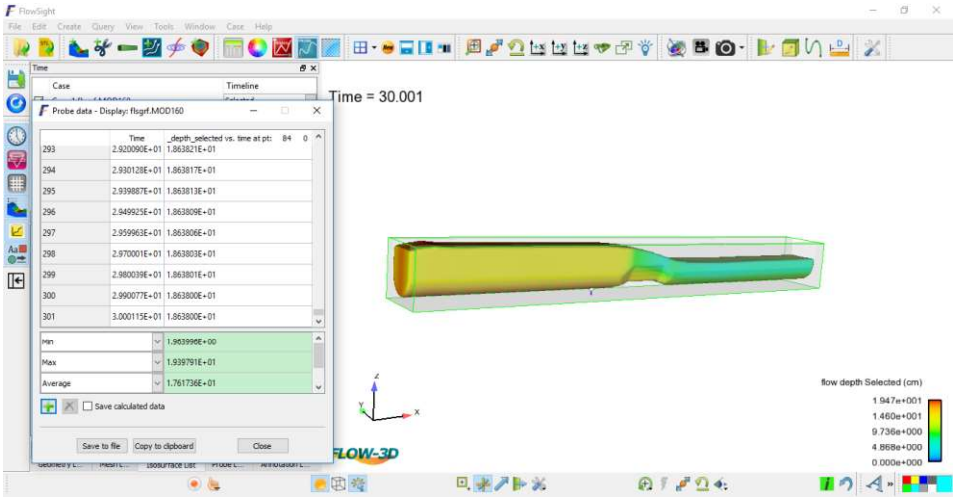
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

MODELACIÓN Q=18.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=17.833 (cm)



FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

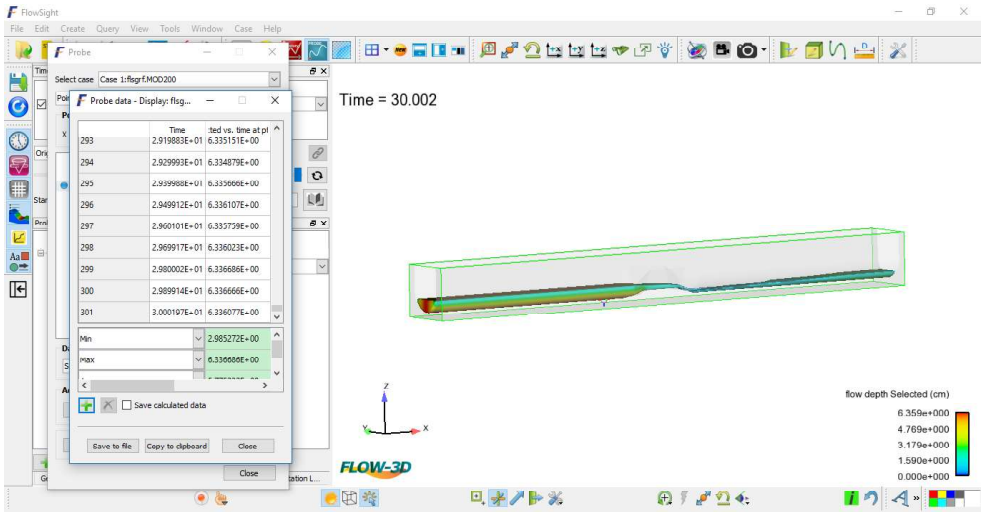
MODELACIÓN Q=20.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=18.638 (cm)



FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2018

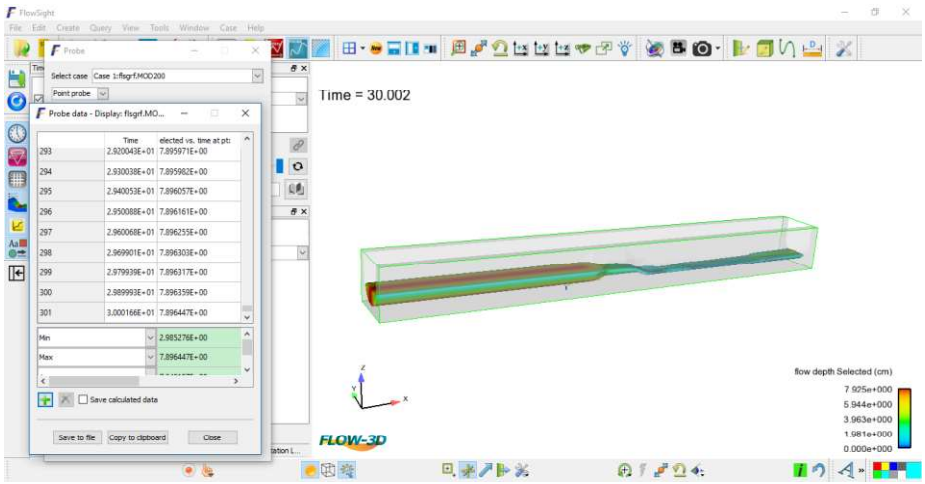
ANEXO N# 3 - RESULTADOS DE LA MODELACIÓN DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=20 CM

MODELACIÓN Q=1.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=6.336 (cm)



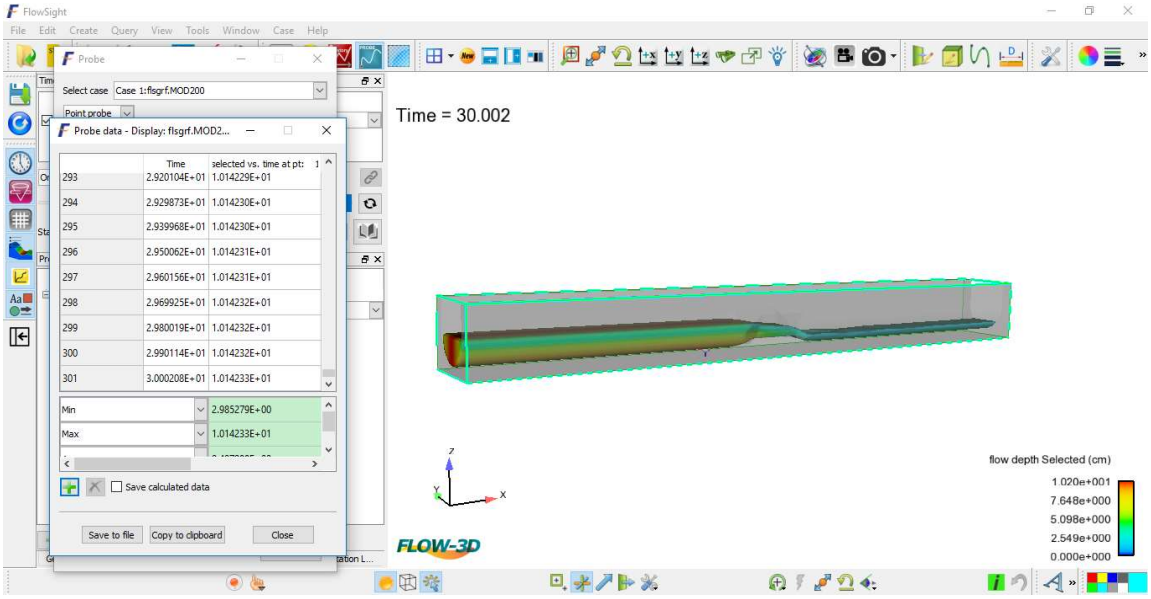
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=2.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=7.896 (cm)



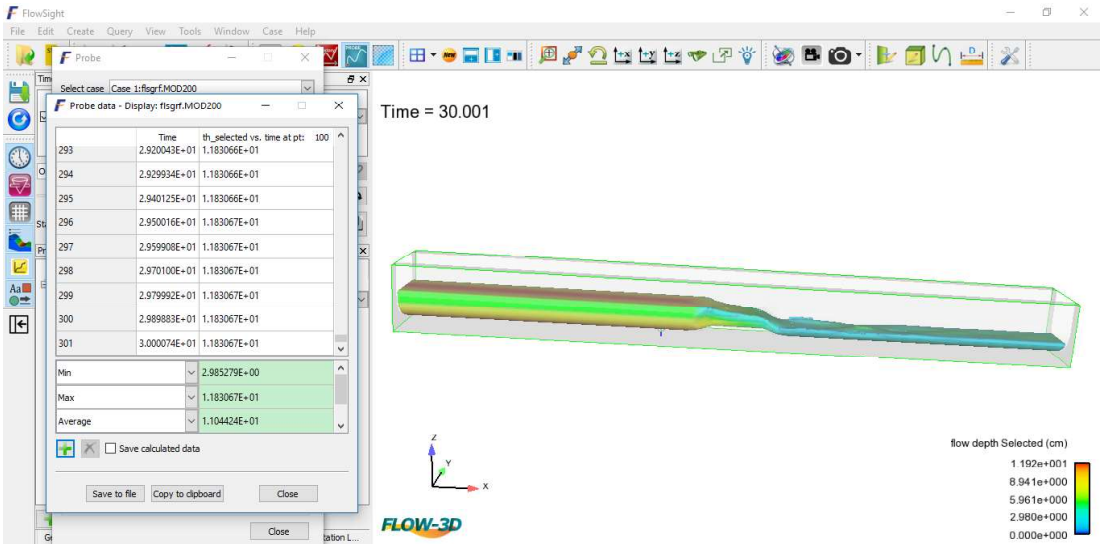
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=4.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=10.142 (cm)



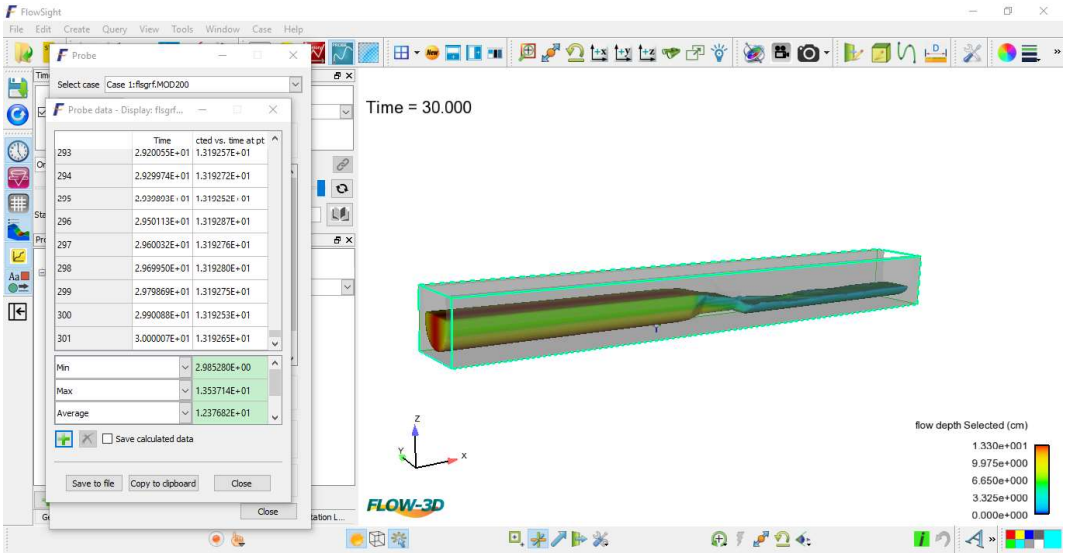
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=6.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=11.830 (cm)



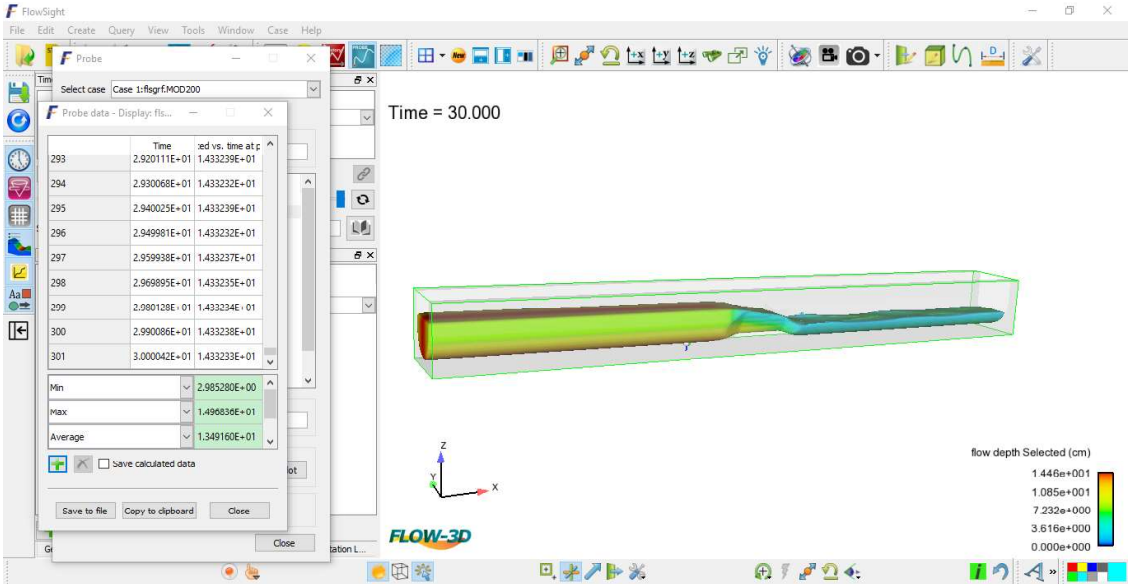
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=8.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=13.192 (cm)



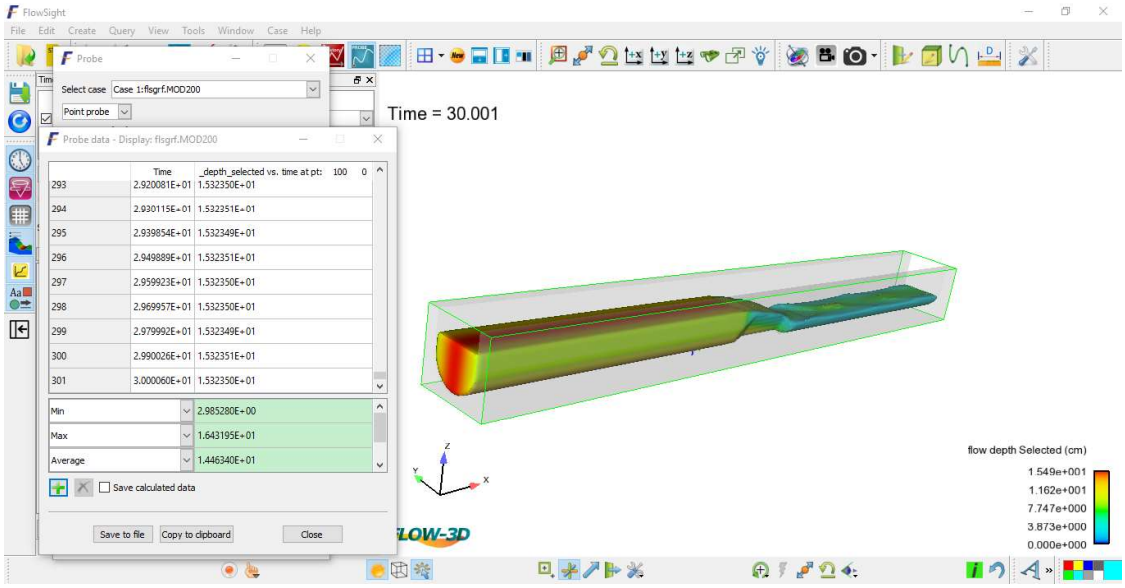
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=10.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=14.332 (cm)



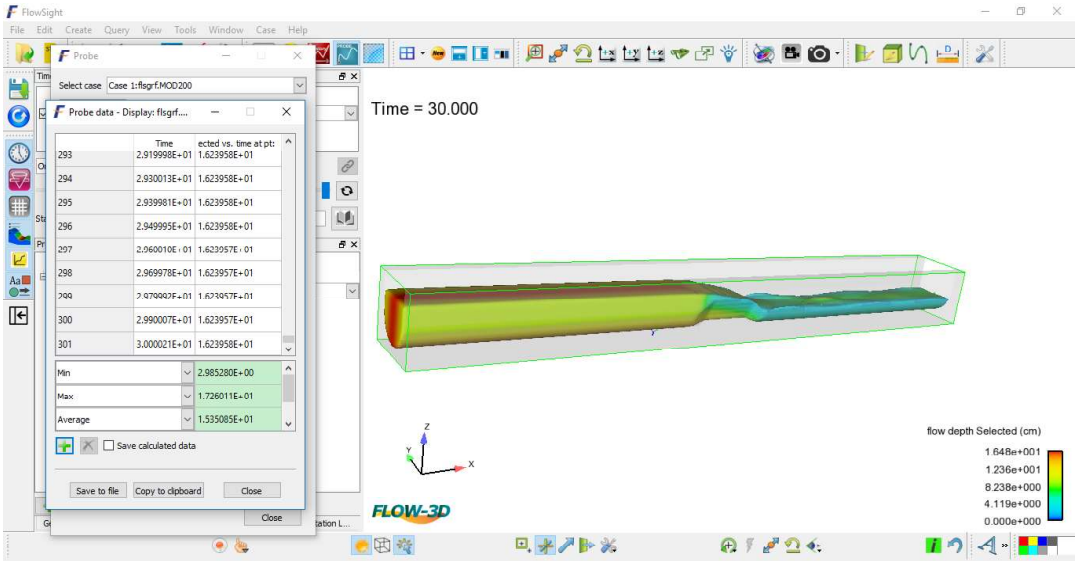
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=12.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=15.323 (cm)



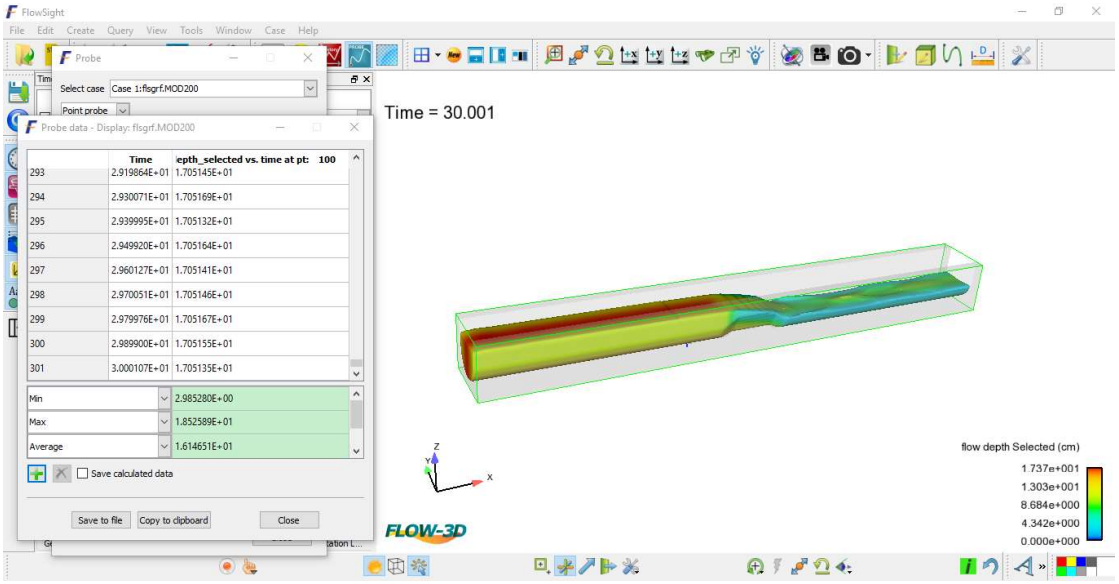
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=14.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=16.239 (cm)



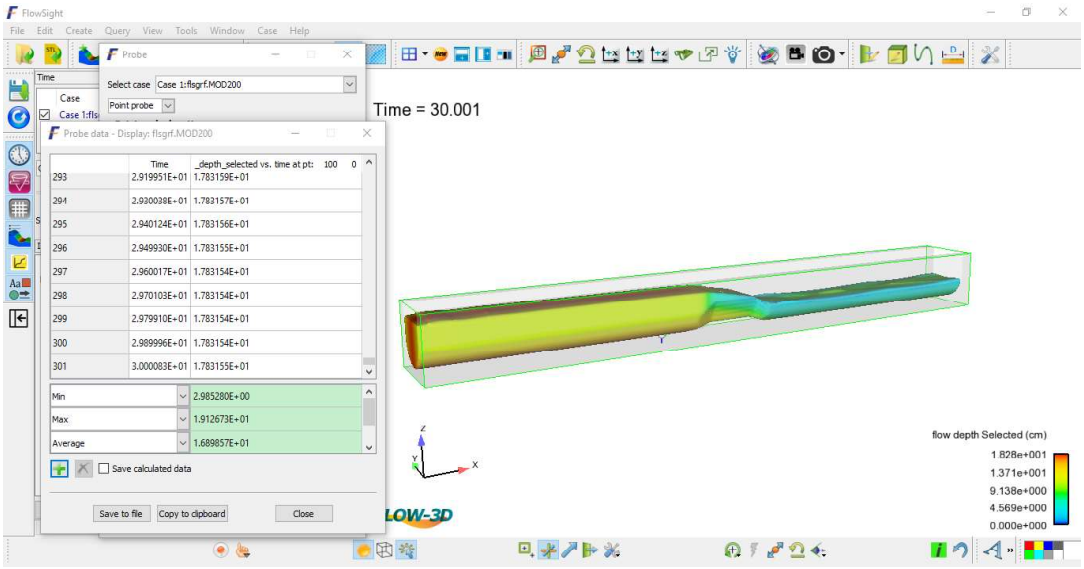
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=16.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=17.051 (cm)



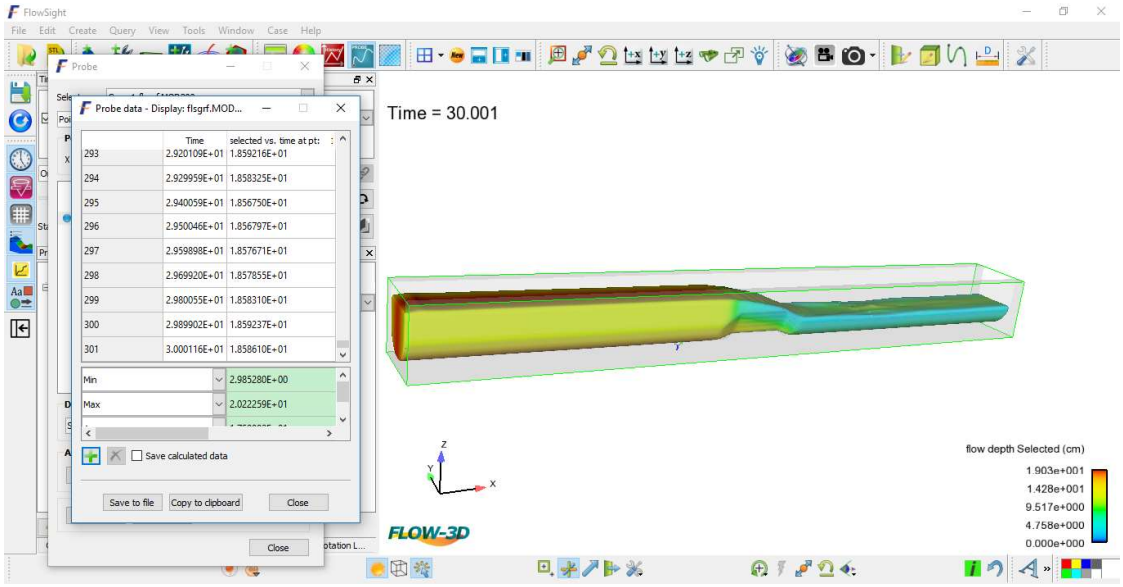
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=18.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=17.831 (cm)



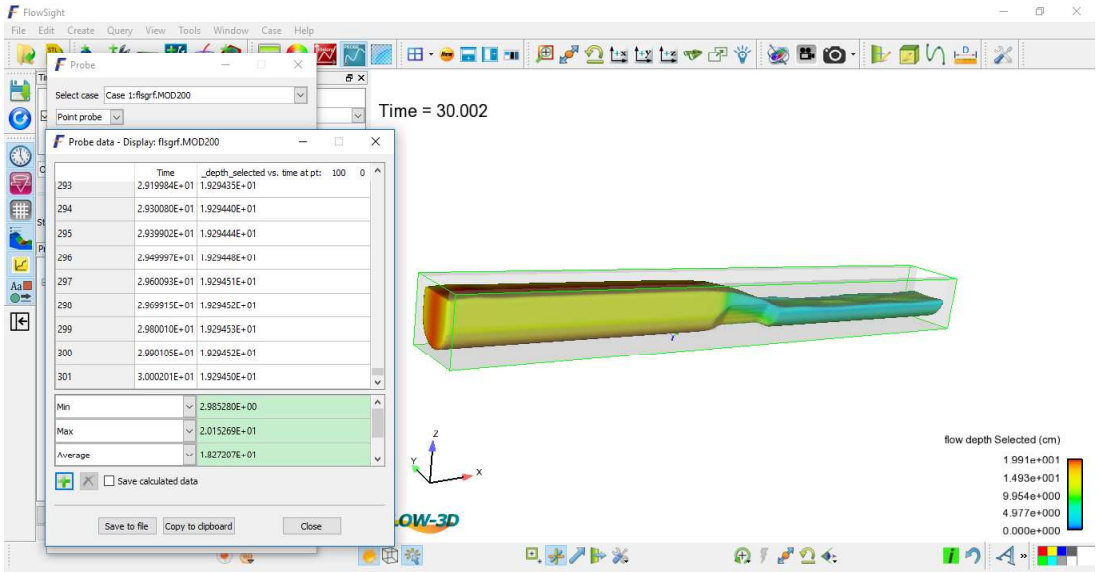
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=20.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=18.586 (cm)



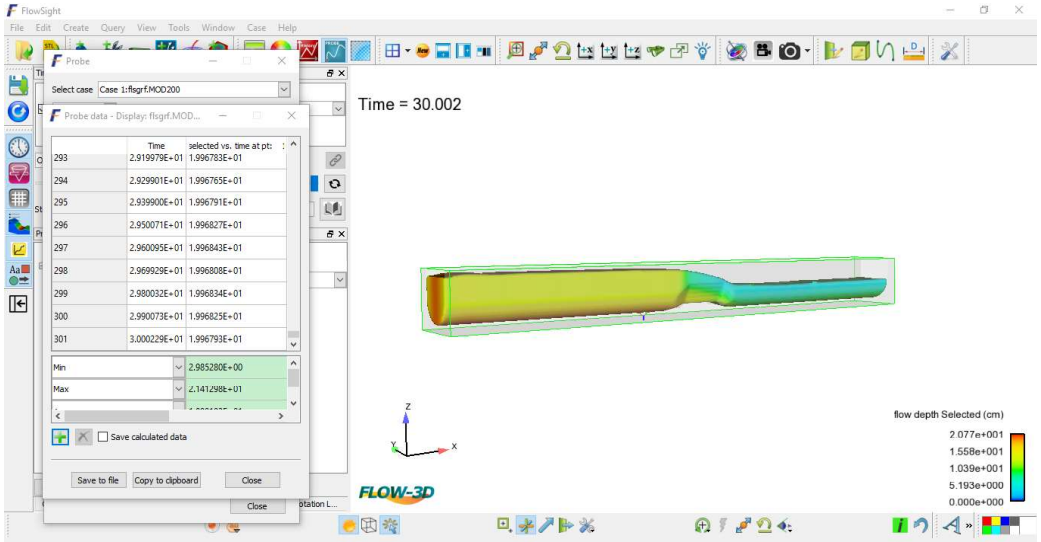
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=22.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=19.294 (cm)



FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

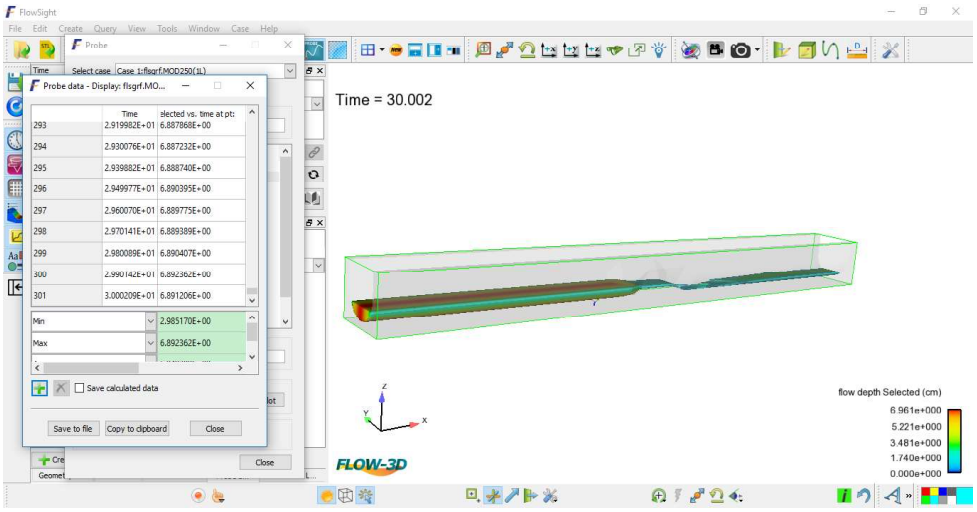
MODELACIÓN Q=24.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=19.967 (cm)



FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

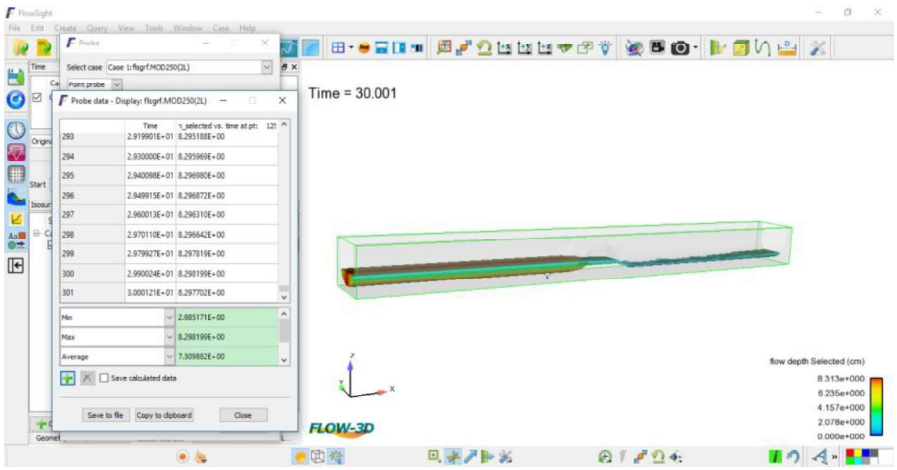
ANEXO N# 4 - RESULTADOS DE LA MODELACIÓN DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=25 CM

MODELACIÓN Q=1.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=6.891 (cm)



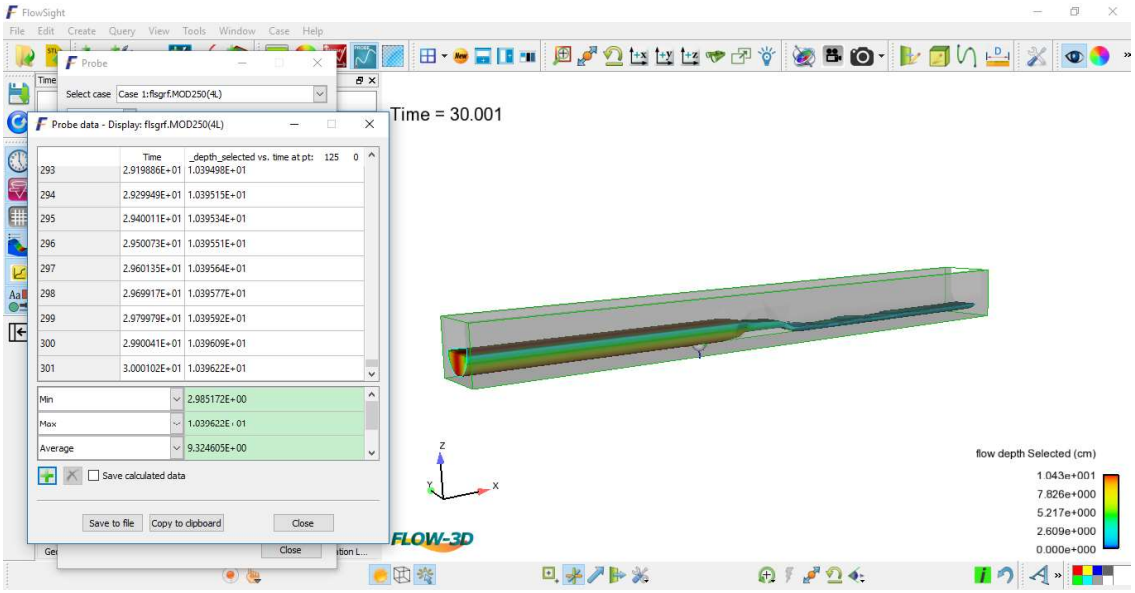
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=2.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=8.297 (cm)



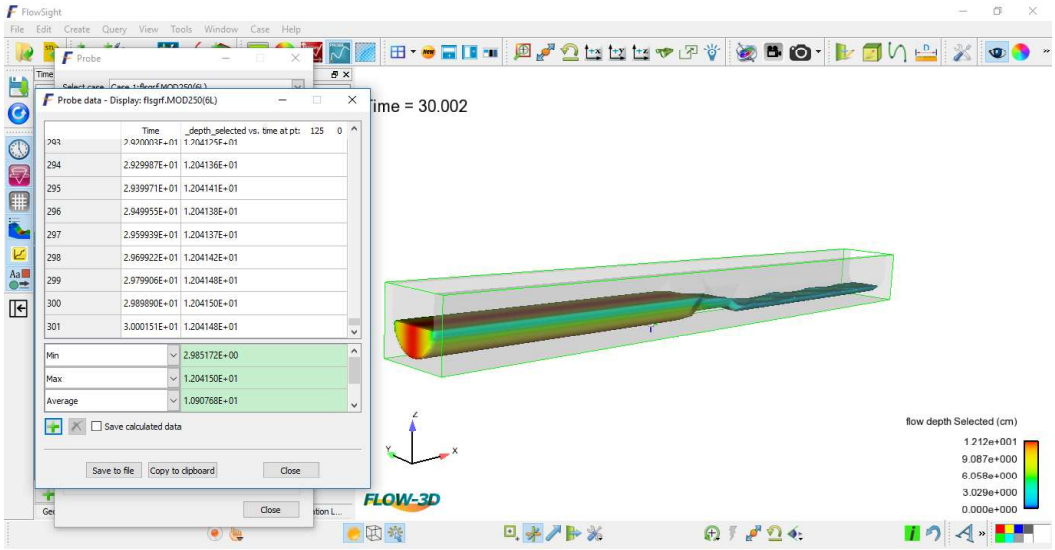
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=4.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=10.396 (cm)



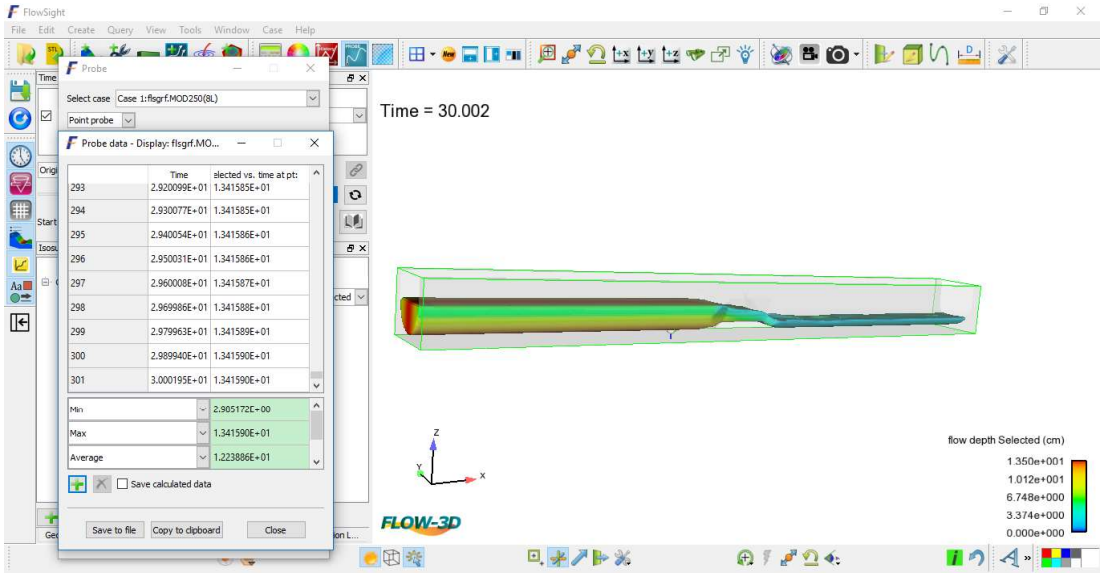
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=6.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=12.041 (cm)



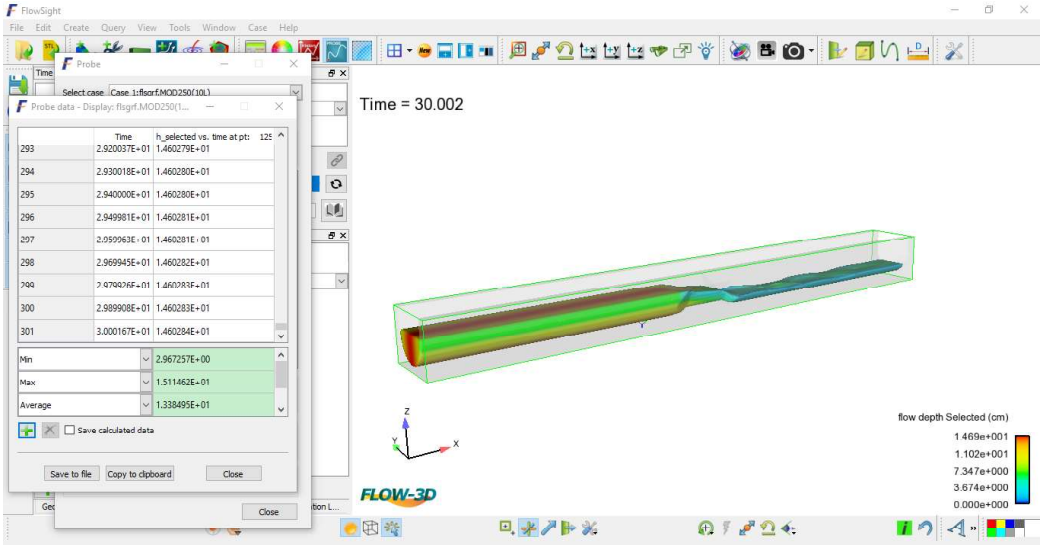
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=8.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=13.415 (cm)



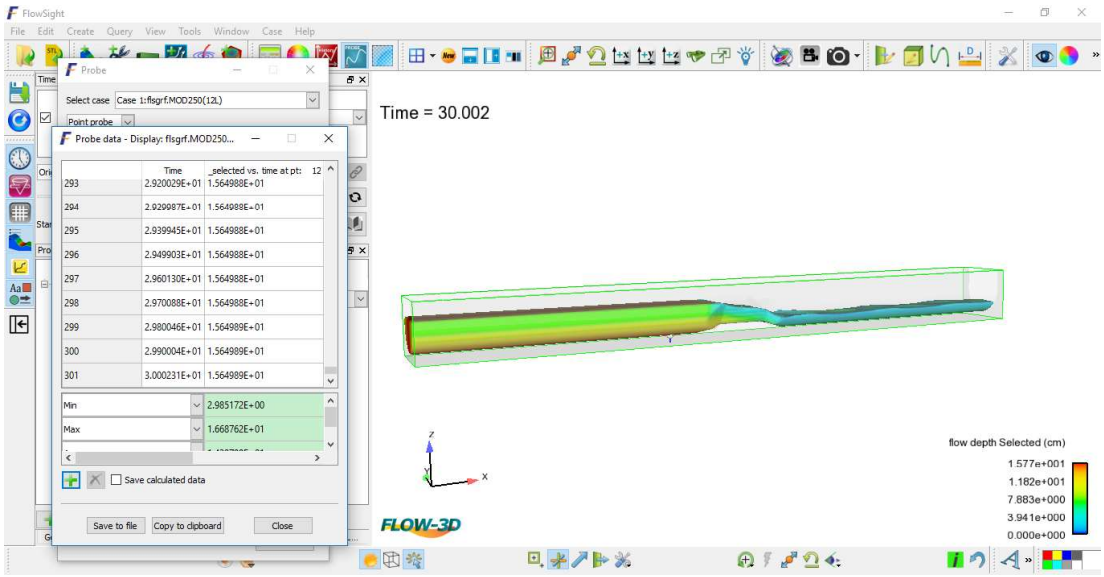
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=10.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=14.602 (cm)



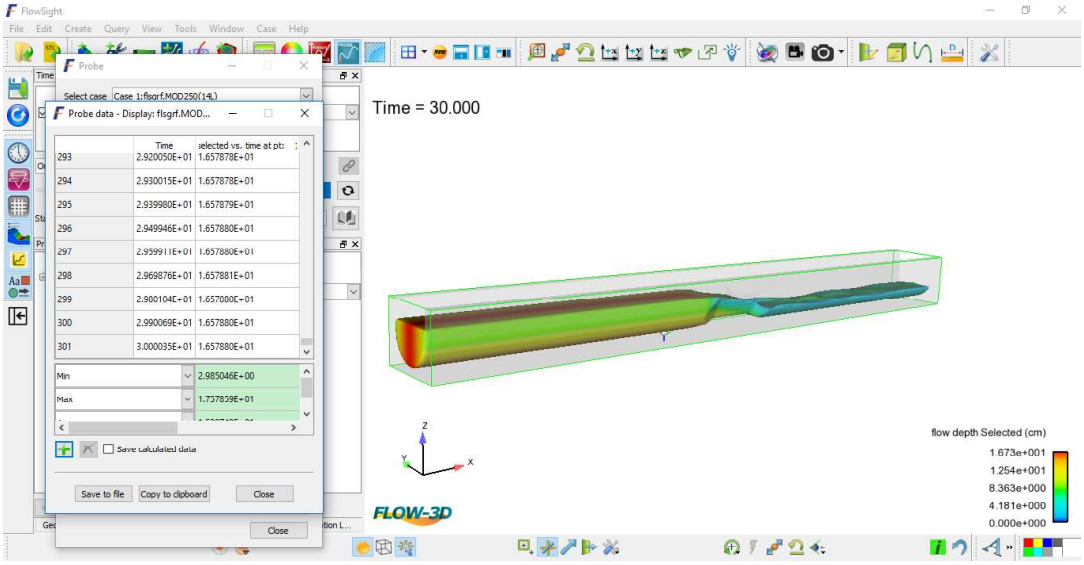
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=12.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=15.649 (cm)



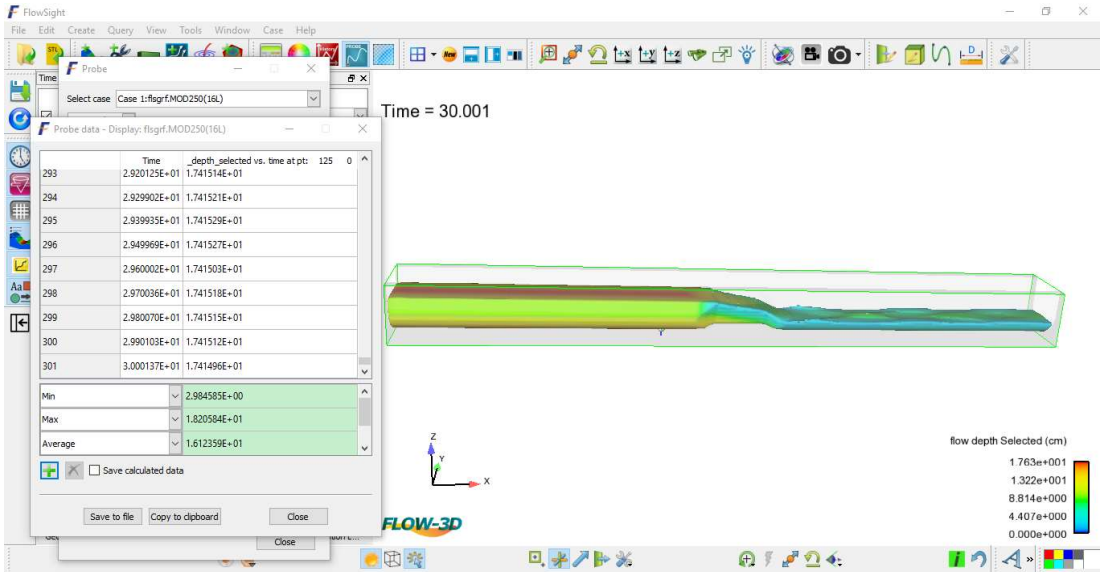
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=14.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=16.578 (cm)



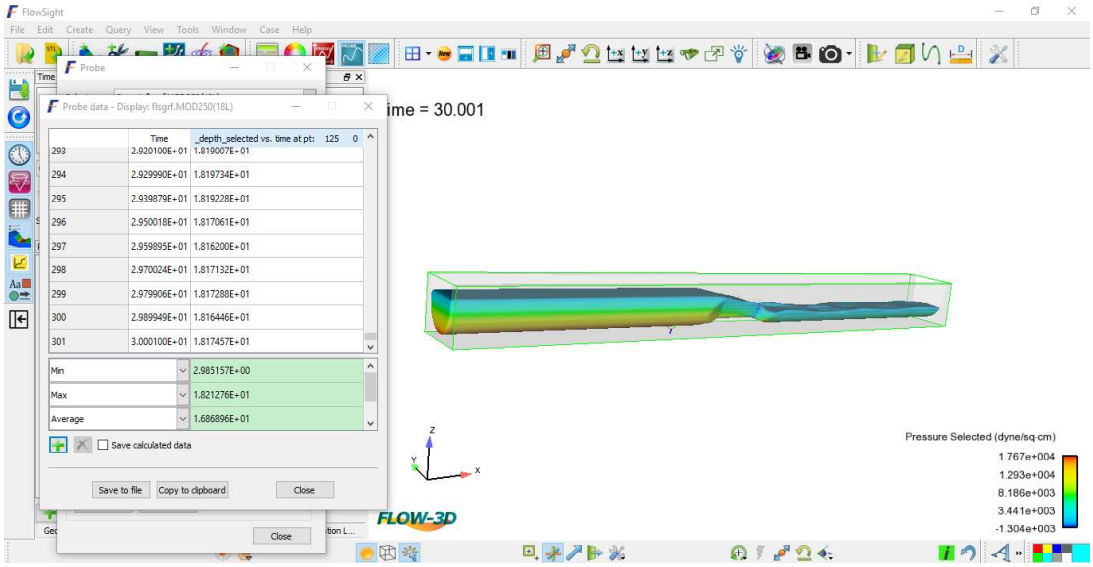
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=16.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=17.414 (cm)



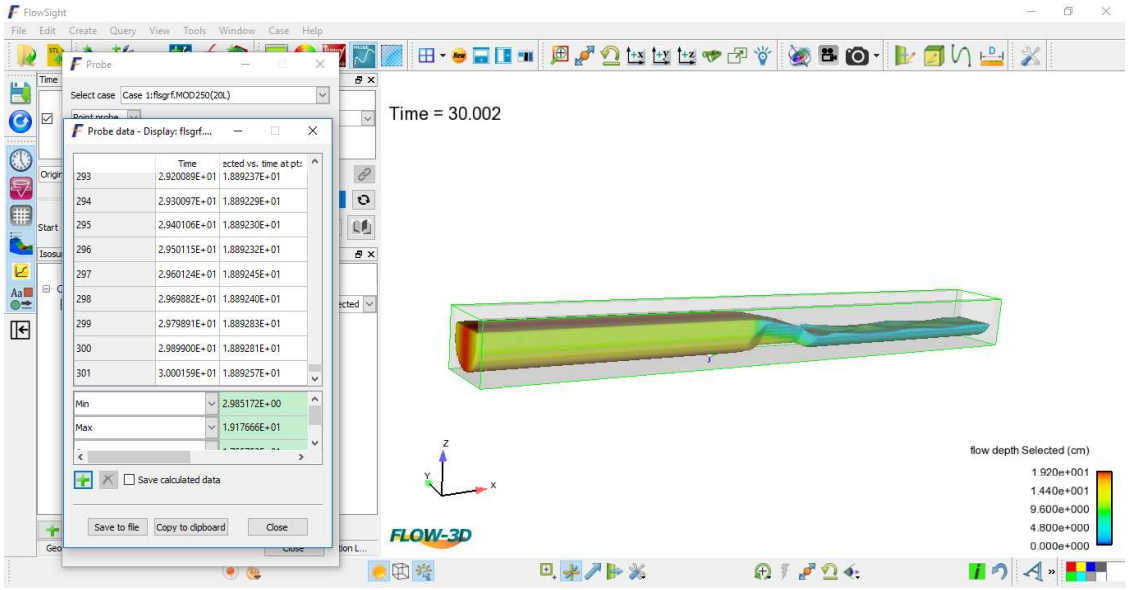
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=18.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=18.174 (cm)



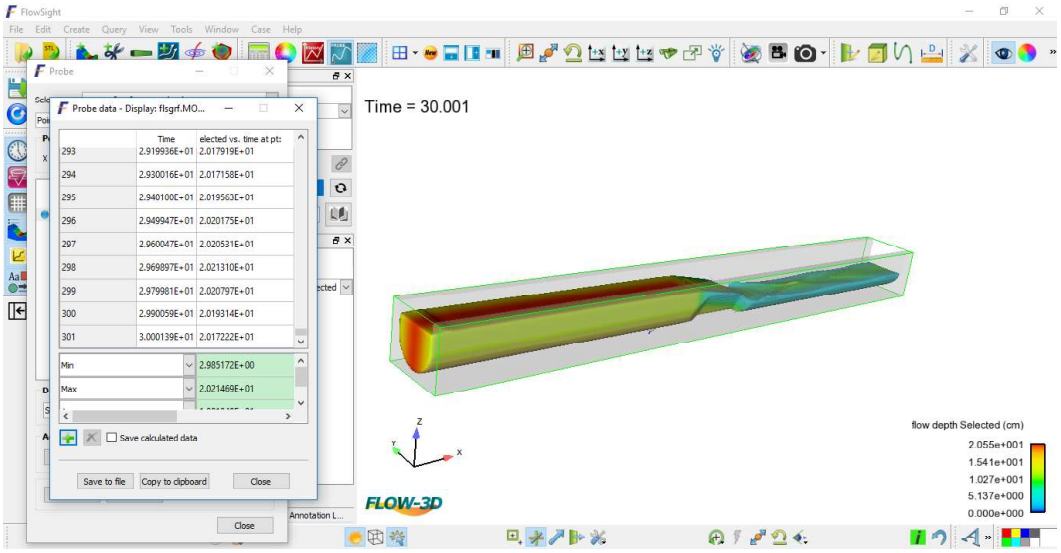
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=20.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=18.892 (cm)



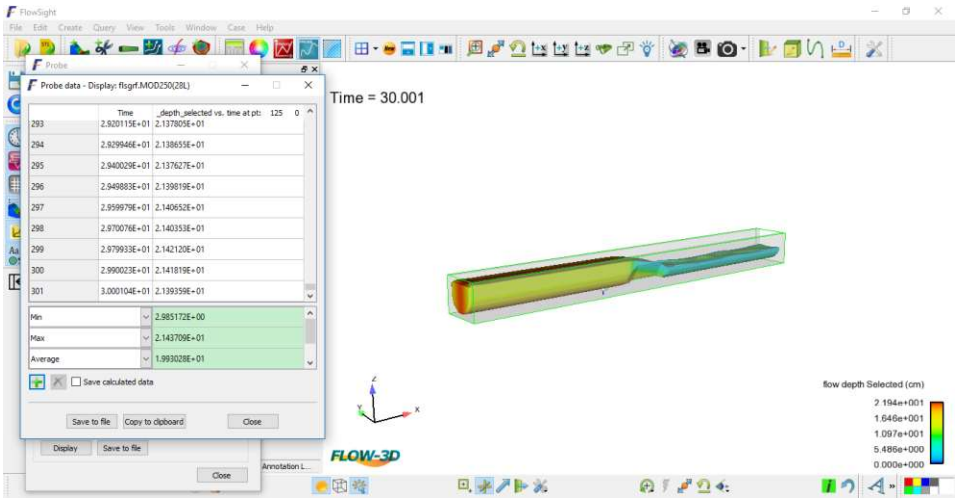
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=24.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=20.172 (cm)



FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

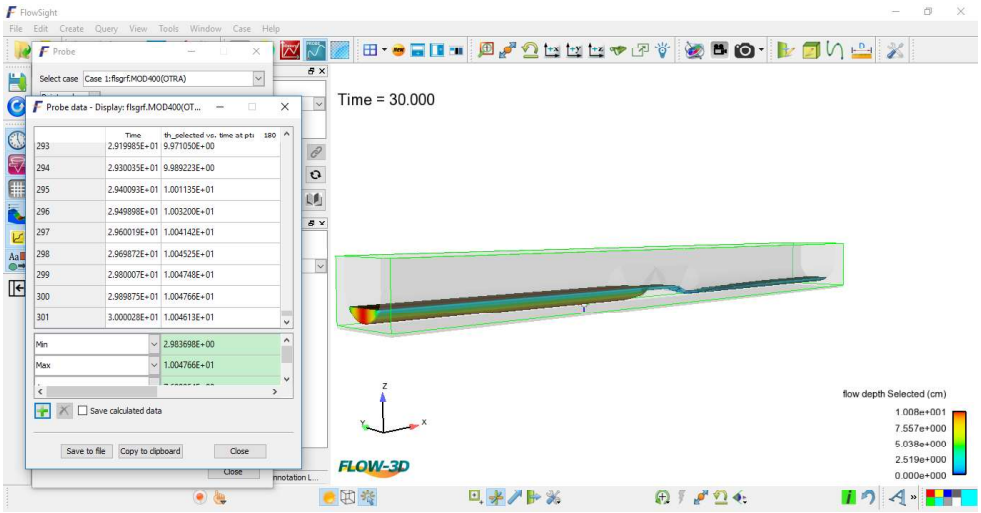
MODELACIÓN Q=28.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=21.393 (cm)



FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

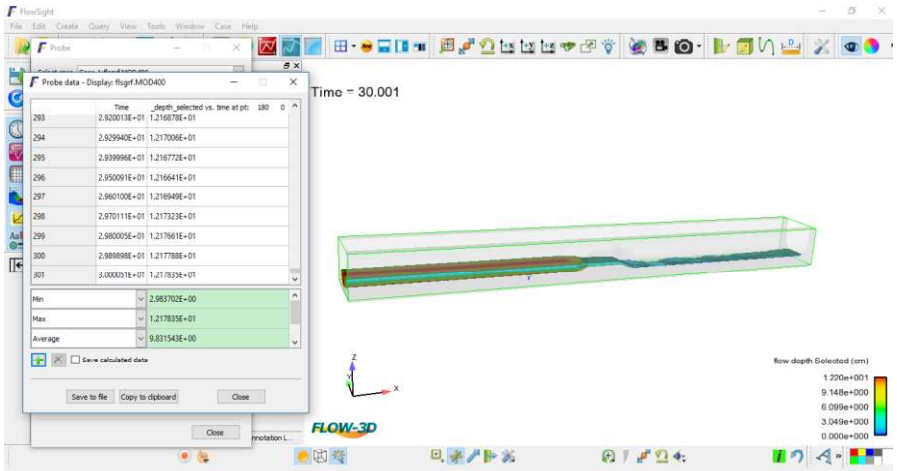
ANEXO N# 5 - RESULTADOS DE LA MODELACIÓN DEL MEDIDOR PALMER-BOWLUS D=40 CM

MODELACIÓN Q=2.50$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=10.046 (cm)



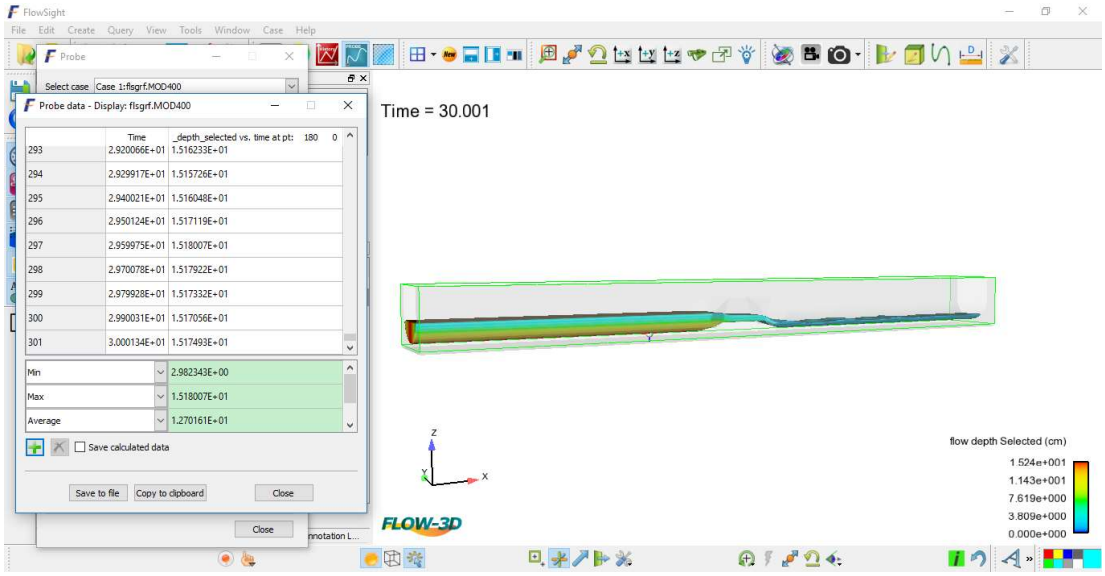
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=5.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=12.178 (cm)



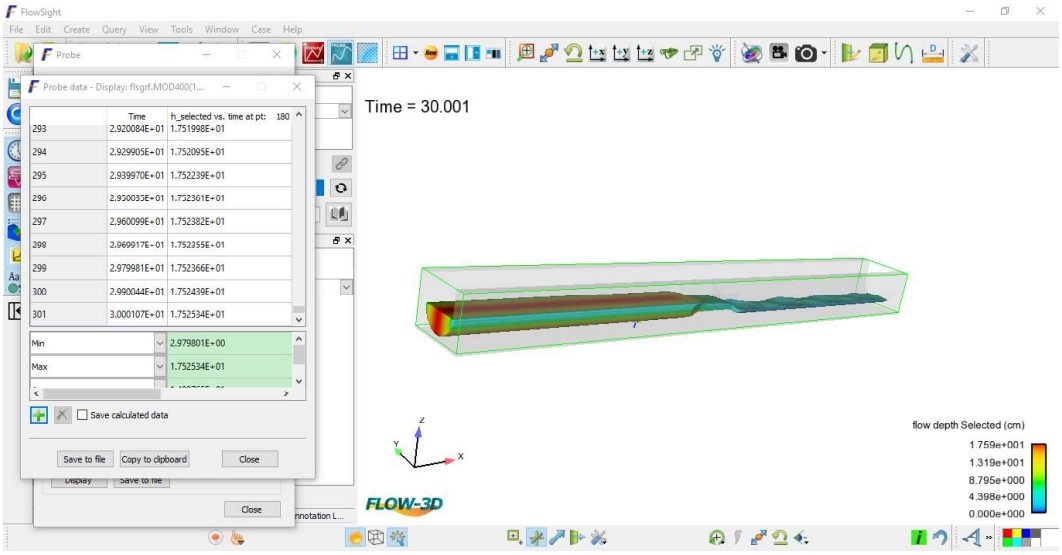
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=10.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=15.174 (cm)



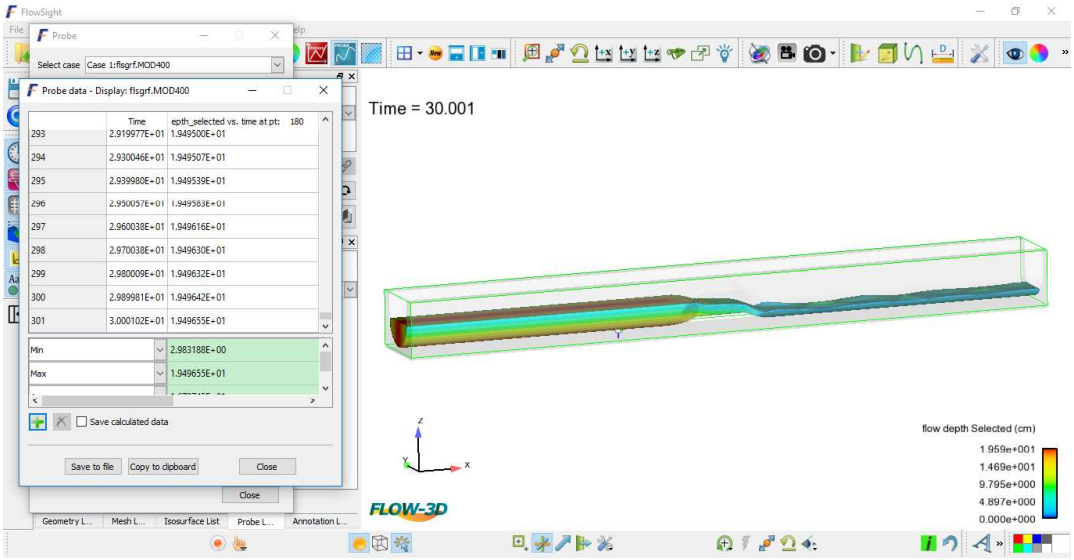
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=15.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=17.525 (cm)



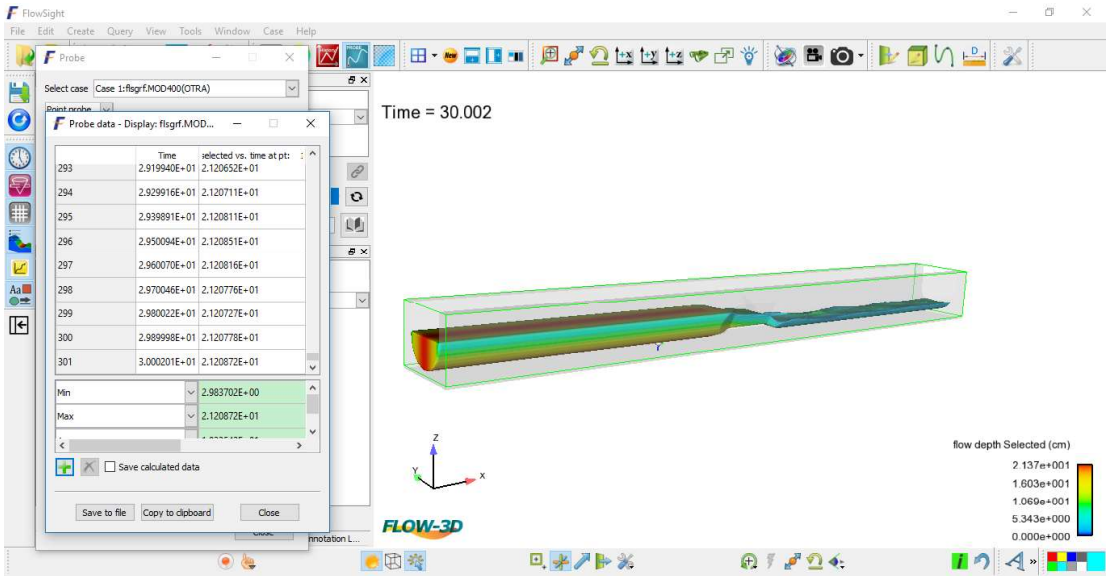
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=20.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=19.496 (cm)



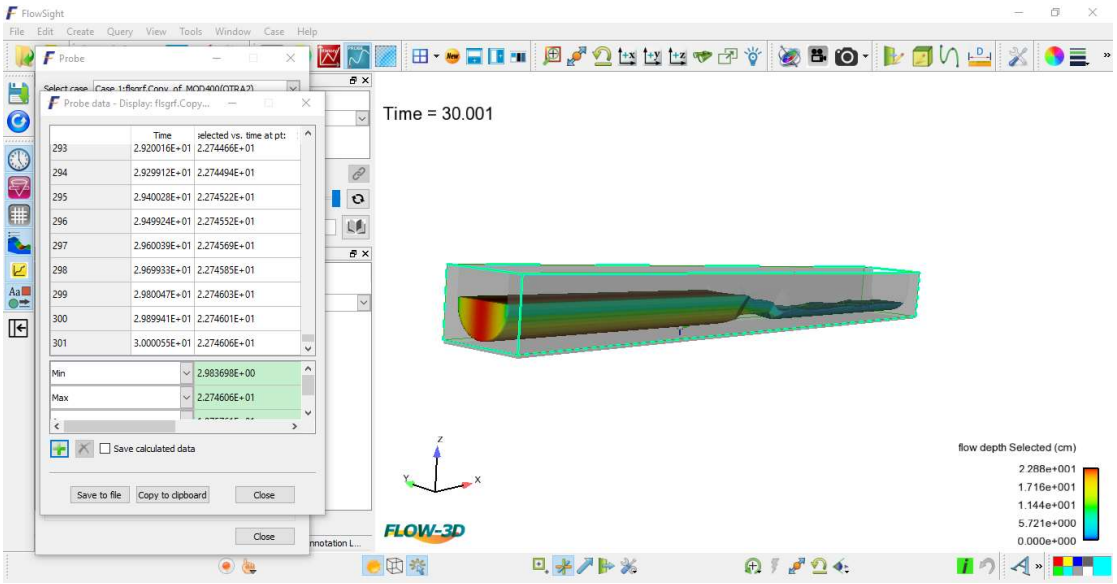
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=25.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=21.208 (cm)



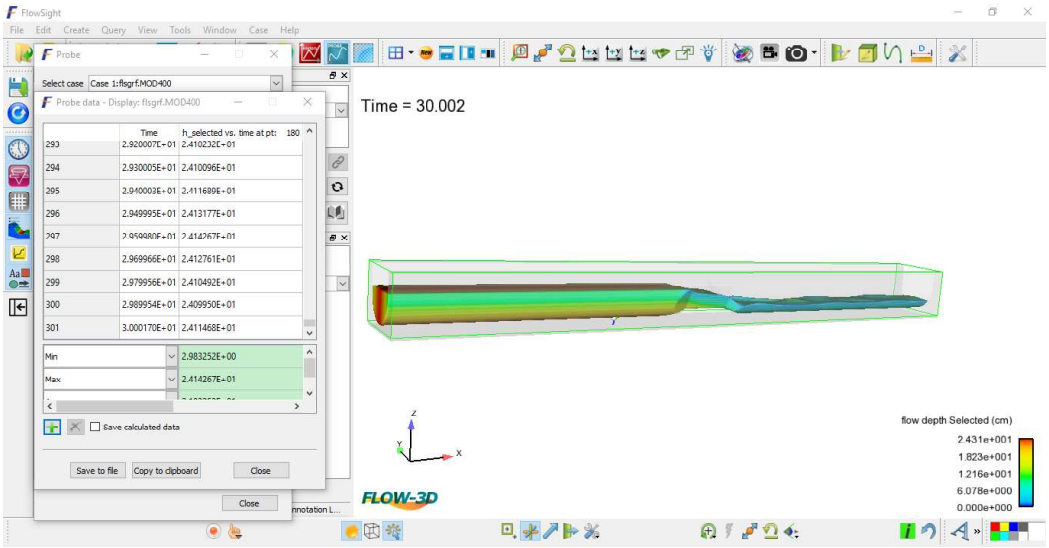
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=30.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=22.746 (cm)



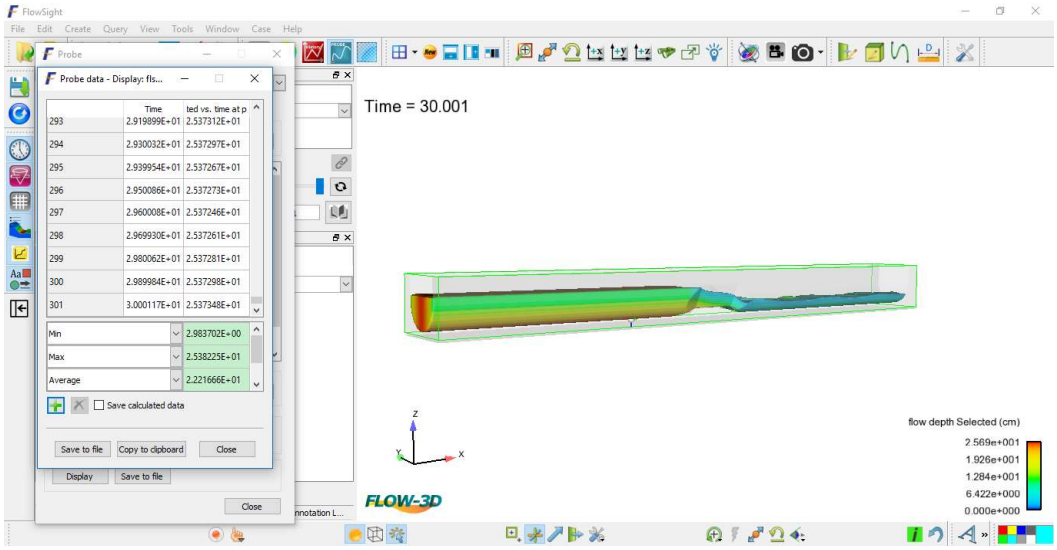
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=35.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=24.114 (cm)



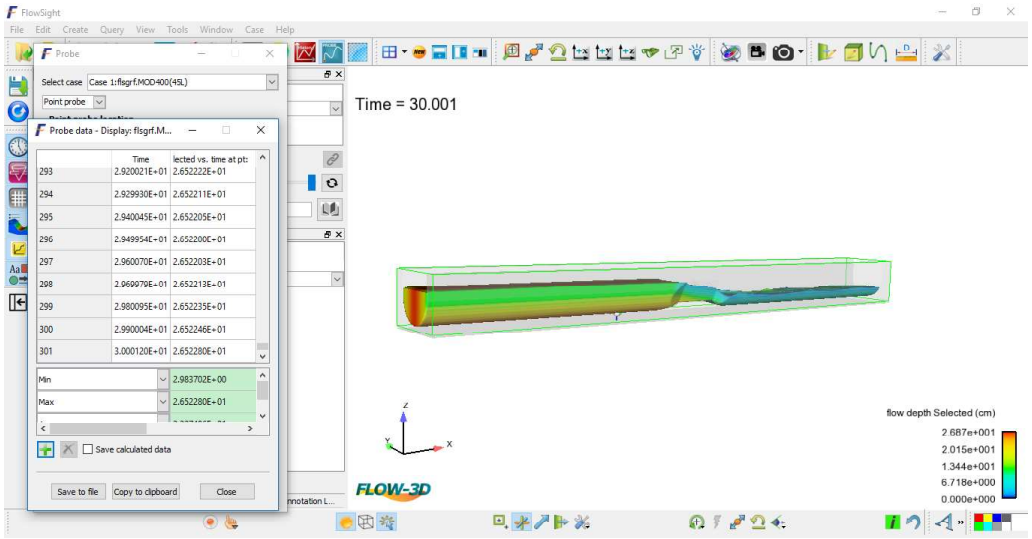
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=40.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=25.373 (cm)



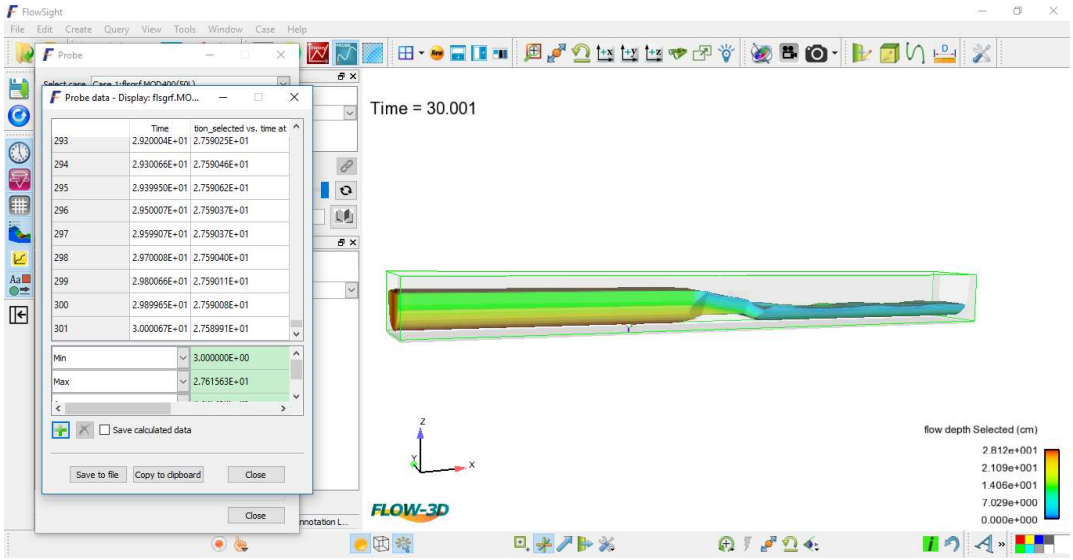
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=45.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=26.522 (cm)



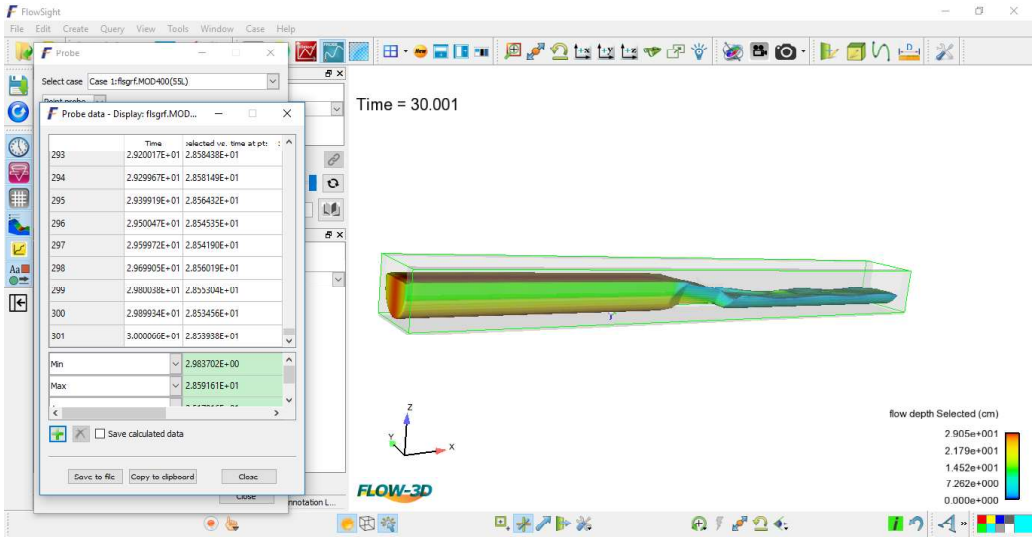
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=50.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=27.589 (cm)



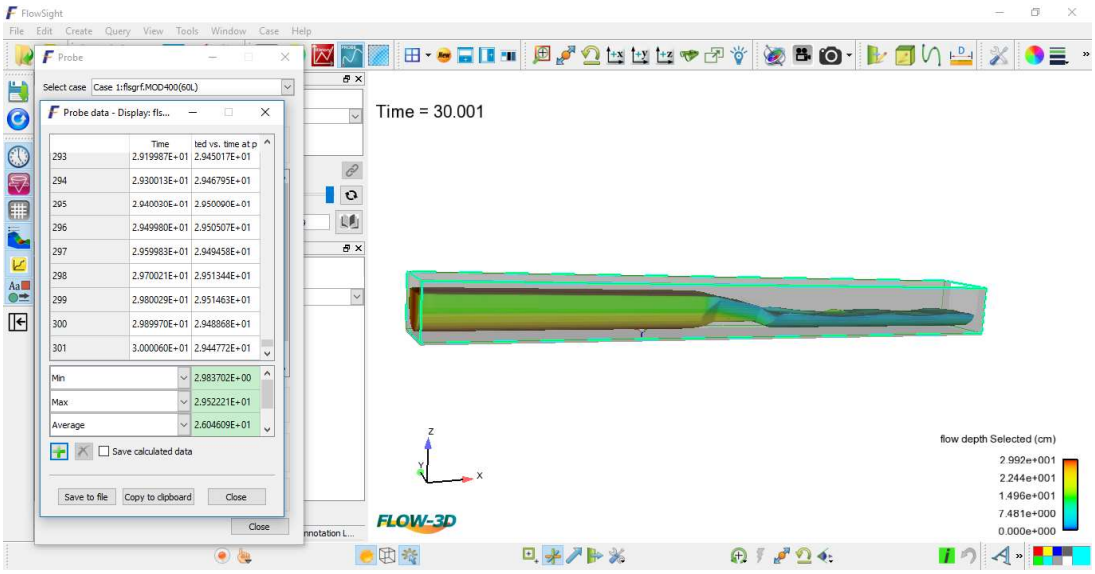
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=55.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H= 28.539(cm)



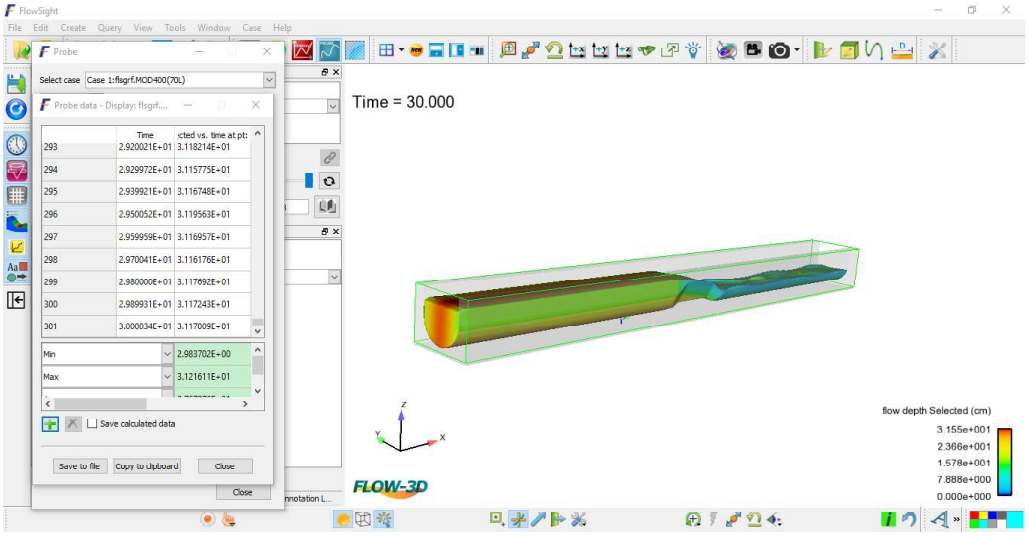
FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=60.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=29.447 (cm)



FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

MODELACIÓN Q=70.00$\left(\frac{l}{s}\right)$, H=31.170 (cm)



FUENTE: Flow-3D V11.2
ELABORACIÓN: Silva Roberto, 2019

ANEXO N#6

MAPAS Y PLANOS