

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS

SIMULACIÓN DE UNA RED DE AIRE COMPRIMIDO CON DOS TOMAS PARA EL LABORATORIO DE TECNOLOGÍA INDUSTRIAL DE LA ESFOT-EPN

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE TECNÓLOGO EN ELECTROMECAÁNICA

DIEGO MIGUEL CRUZ VELA

diego.cruz01@epn.edu.ec

FRANCISCO XAVIER OSORIO AMAGUAÑA

francisco.osorio@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. HUGO ZÚÑIGA MSc.

hugo.zuniga@epn.edu.ec

CODIRECTOR: ING. MIGUEL ORTEGA MSc.

miguel.ortega@epn.edu.ec

Octubre, 2020

Declaración

Nosotros, Diego Miguel Cruz Vela y Francisco Xavier Osorio Amaguaña declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Sin perjuicio de los derechos reconocidos en el primer párrafo del artículo 114 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación -COESC-, somos titulares de la obra en mención y otorgamos una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva de uso con fines académicos a la Escuela Politécnica Nacional. Entregaremos toda la información técnica pertinente. En el caso de que hubiese una explotación comercial de la obra por parte de la EPN, se negociará los porcentajes de los beneficios conforme lo establece la normativa nacional vigente.



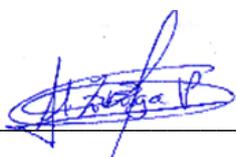
Diego Cruz



Francisco Osorio

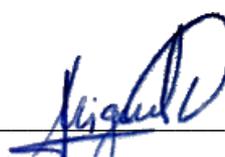
CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Diego Miguel Cruz Vela y Francisco Xavier Osorio Amaguaña, bajo nuestra supervisión.



Ing. Hugo Zúñiga MSc.

DIRECTOR DE PROYECTO



Ing. Miguel Ortega MSc.

CODIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis abuelos, padres y hermano por su apoyo incondicional, dedicación y amor a lo largo de mi trayectoria estudiantil.

Diego

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis abuelos, padres y hermanos, quienes con su amor, paciencia y dedicación me han alentado para continuar con mis estudios.

Francisco

DEDICATORIA

Dedico el siguiente trabajo a mis abuelos, padres, hermano y a todas las personas que de una u otra manera me ayudaron a cumplir una meta más en mi vida.

Diego

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi hermano menor quien me tiene de ejemplo como hombre y profesional, para que sepa que todo es posible con esfuerzo y dedicación.

Francisco

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Justificación.....	1
1.3 Objetivos	2
2. METODOLOGÍA	3
2.1 Tipo de investigación.....	3
2.2 Descripción de metodología usada.....	3
3. RESULTADO Y DISCUSIÓN	5
3.1 Fundamentos teóricos	5
3.2 Análisis de métodos para dimensionamiento de tuberías de aire comprimido	11
3.3 Demanda de aire y diagrama unifilar	22
3.4 Dimensionamiento de la red de aire comprimido	25
3.5 Análisis de la línea crítica del sistema	30
3.6 Metodología de la simulación en ANSYS	31
3.7 Validación de la simulación con el caso de flujo interno de un tubo calculado en la sección 3.2.....	43
3.8 Simulación de las tuberías de la red del laboratorio	44
3.9 Análisis de sensibilidad de la red con diferentes diámetros	48
3.10 Análisis de sensibilidad con diferentes materiales	54
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
4.1 Conclusiones.....	60
4.2 Recomendaciones.....	61
5. BIBLIOGRAFÍA	62
6. ANEXOS	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema de la metodología utilizada.....	4
Figura 3.1 Flujo laminar	5
Figura 3.2 Flujo turbulento	6
Figura 3.3 Tipos de presiones referidos a nivel del mar	8
Figura 3.4 Caída de presión en tubería horizontal	9
Figura 3.5 Fricción dentro de un tubo	9
Figura 3.6 Caída de presión en una tubería horizontal con una válvula	10
Figura 3.7 Compresor de pistón.....	11
Figura 3.8 Diagrama de caso de flujo interno.....	12
Figura 3.9 Diagrama de Moody.....	16
Figura 3.10 Nomograma de Festo	19
Figura 3.11 Medidas tomadas para el dimensionamiento de la red.....	22
Figura 3.12 Diagrama unifilar propuesto para el Laboratorio (LTI)	23
Figura 3.13 Red de aire comprimido tubería completa.....	24
Figura 3.14 Tubería PVC	24
Figura 3.15 Tee de Cobre.....	25
Figura 3.16 Tubería de acero inoxidable.....	25
Figura 3.17 Tabla de longitudes equivalentes	27
Figura 3.18 Resultado del diagrama unifilar en 3D	30
Figura 3.19 Pasos a seguir para una simulación en ANSYS.....	31
Figura 3.20 Herramientas de Workbench.....	32
Figura 3.21 Importación del modelo 3D	32
Figura 3.22 Tubo en la herramienta Geometry.....	33
Figura 3.23 Extracción de volumen en Geometry	33
Figura 3.24 Volumen extraído.....	34
Figura 3.25 Nombramiento de cara en Mesh	34
Figura 3.26 Selección de volumen para creación de malla	35
Figura 3.27 Creación de mallado	35
Figura 3.28 Herramienta Setup.....	36
Figura 3.29 Verificación de unidades	36
Figura 3.30 Configuración de viscosidad	37
Figura 3.31 Configuración de parámetros del fluido.....	37
Figura 3.32 Configuración de parámetros del material.....	38
Figura 3.33 Ventana para la configuración de parámetros en la tubería	38
Figura 3.34 Configuración de parámetros de entrada	39

Figura 3.35 Configuración del método de solución	39
Figura 3.36 Configuración de inicialización	40
Figura 3.37 Configuración de iteraciones.....	40
Figura 3.38 Cálculos de iteraciones	41
Figura 3.39 Resultados de iteración realizada	41
Figura 3.40 Corte de un plano en la tubería	42
Figura 3.41 Contorno de presión en la tubería	42
Figura 3.42 Simulación de caso de flujo interno.....	43
Figura 3.43 Simulación de la red de tubería.....	44
Figura 3.44 Comparación entre cálculos y simulación en el tramo A-B.....	45
Figura 3.45 Comparación entre cálculos y simulación en el tramo B-D.....	45
Figura 3.46 Comparación entre cálculos y simulación en el tramo B-C.....	46
Figura 3.47 Toma de dato de presión en el punto A	46
Figura 3.48 Toma de dato de presión en el punto B	47
Figura 3.49 Toma de dato de presión en el punto D	47
Figura 3.50 Toma de dato de presión en el punto C	48
Figura 3.51 Extracto de tramo A-B (22.2 mm).....	49
Figura 3.52 Extracto de la división Tee en la red (22.2 mm)	49
Figura 3.53 Extracto del tramo B-D (13.4 mm).....	50
Figura 3.54 Extracto de tramo B-C (17.2 mm).....	50
Figura 3.55 Extracto de tramo A-B (18.4 mm).....	51
Figura 3.56 Extracto de la división Tee en la red (18.4 mm)	52
Figura 3.57 Extracto del tramo B-D (13.9 mm).....	52
Figura 3.58 Extracto de tramo B-C (16.1 mm).....	53
Figura 3.59 Extracto de tramo A-B (Acero)	54
Figura 3.60 Extracto de tramo B-D (Acero)	55
Figura 3.61 Extracto tramo B-C (Acero).....	55
Figura 3.62 Extracto tramo A-B (Cobre).....	56
Figura 3.63 Extracto de tramo B-D (Cobre).....	56
Figura 3.64 Extracto de tramo B-C (Cobre).....	57
Figura 3.65 Extracto del tramo A-B (PVC)	57
Figura 3.66 Extracto del tramo B-D (PVC)	58
Figura 3.67 Extracto del tramo B-C (PVC)	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Resultados del Método A	15
Tabla 3.2 Resultados del Método B	17
Tabla 3.3 Comparación de cálculos entre métodos	20
Tabla 3.4 Ventajas y desventajas de los métodos	20
Tabla 3.5 Ponderación de métodos	21
Tabla 3.6 Cálculo de unidades de consumo de aire.....	23
Tabla 3.7 Diámetros calculados sin accesorios.....	26
Tabla 3.8 Longitudes equivalentes tramo A-B.....	28
Tabla 3.9 Longitudes equivalentes tramo B-D	28
Tabla 3.10 Longitudes equivalentes tramo B-C.....	29
Tabla 3.11 Longitudes equivalentes tramo D-E.....	29
Tabla 3.12 Diámetros calculados con accesorios	29
Tabla 3.13 Diámetros calculados y escogidos por tramo de tubería	29
Tabla 3.14 Análisis de la caída de presión en la línea crítica	30
Tabla 3.15 Comparación de caso de flujo interno de un tubo.....	43
Tabla 3.16 Comparación entre simulación y cálculos (ΔP)	48
Tabla 3.17 Comparación de caída de presión simulada entre diámetro calculado y de catálogo.....	53
Tabla 3.18 Comparación de caída de presión simulada entre materiales	59

Resumen

En el presente proyecto de titulación se dimensiona y simula las tuberías de distribución de la red de aire comprimido para el Laboratorio de Tecnología Industrial (LTI) de la Escuela de Formación de Tecnólogos (ESFOT) de la Escuela Politécnica Nacional (EPN).

Se realizó una investigación de distintos métodos para el dimensionamiento de tuberías neumáticas, donde se aplicó los respectivos procedimientos para calcular la caída de presión en un caso de estudio de flujo interno de una tubería de 40 (m) de longitud, 46 (mm) de diámetro interno y 600 (Nm³/h) de caudal, dando como resultado en cada método: Flujo interno con ecuación de Colebrook ($\Delta P = 13383$ Pa), Flujo interno con diagrama de Moody ($\Delta P = 12743$ Pa), Fórmula propuesta por fabricante Atlas CopCo ($\Delta P = 13150$ Pa), Fórmula de Parker propuesta por el fabricante ($\Delta P = 12550$ Pa) y Uso del Nomograma de Festo ($\Delta P = 10800$ Pa). Mediante los resultados obtenidos se compara los valores de dichos métodos respecto a la referencia (Ecuación de Colebrook), escogiendo el método del fabricante Atlas CopCo, ya que tiene una diferencia de 1.74 (%) con la referencia (Ecuación de Colebrook) y además es sencillo, tiene disponible información para los diferentes accesorios y considera la altitud de Quito.

Posteriormente, se elaboró el diagrama unifilar de la red, se tomó en cuenta el plano de ampliación del Laboratorio de Tecnología Industrial con el cual se realizó la ubicación de los distintos elementos que componen la red. Para los valores de caudal y presión de los componentes se consideró la información de catálogos de los equipos neumáticos, obteniendo el consumo total de aire de la red (13.92 NCFM).

Se procedió a determinar los diámetros internos de las tuberías sin accesorios, se obtuvo un criterio para seleccionarlos y posteriormente se recalcularon considerando los accesorios y así obtener el diámetro de la tubería real de la red de distribución de aire comprimido. Por ejemplo, en el tramo A-B (desde el compresor hacia la primera derivación) por el cual circulan 13.92 (NCFM), el diámetro de la tubería es de: 18.46 (mm). Después de haber obtenido los resultados se seleccionan las tuberías adecuadas en catálogos, se realizó los planos en AutoCAD.

Posteriormente, se realizó la simulación del caso de flujo interno dando como resultado $\Delta P = 13.3$ (kPa), para de esta manera validar los métodos utilizados. La diferencia de la simulación con el método de referencia (Colebrook) fue de 0.67 (%) y con el método utilizado de Atlas Copco fue de 1.12 (%). Una vez validada la simulación, se prosiguió a realizar la simulación de la red de distribución de aire comprimido del Laboratorio de Tecnología Industrial (LTI), en la cual por ejemplo en el tramo A-B la caída de presión fue de 1.28 (kPa) respecto a los 1 (kPa) del método utilizado.

Con la simulación se compara resultados de caída de presión entre diámetros calculados y de catálogo, obteniendo una menor caída de presión en las tuberías de catálogos ya que aumenta el diámetro y finalmente se compara valores de caídas de presión entre diferentes materiales de tuberías como por ejemplo en el tramo A-B: acero ($\Delta P = 1.28$ kPa), cobre ($\Delta P = 1.07$ kPa) y PVC ($\Delta P = 0.93$ kPa).

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

La Escuela de Formación de Tecnólogos (ESFOT) actualmente ofrece las materias de: Fluidos para Transmisión de Potencia, Instrumentación, Control y Electrónica Industrial, en las cuales se realiza prácticas de laboratorio en módulos neumáticos con varios cilindros, acondicionamiento de tomas de presión, plantas didácticas que utilizan aire comprimido, entre otros. Para el desarrollo de estas, se utiliza aire comprimido provisto por un compresor pequeño de 1(HP) con una presión máxima de 125 (PSI), que no llega a abastecer varios módulos simultáneamente. El equipo debe transportarse manualmente a través de los distintos módulos para su funcionamiento, ya que no se cuenta con una red de distribución dimensionada correctamente y tampoco con un compresor de mayor capacidad.

1.2 Justificación

El propósito del proyecto se centra en el dimensionamiento y simulación de un sistema de distribución de aire comprimido con dos tomas para el Laboratorio de Tecnología Industrial de la Escuela de Formación de Tecnólogos (ESFOT) para mejorar las prácticas dentro de las materias ofertadas, en las cuales se requiere el uso de aire comprimido en los diferentes módulos.

Actualmente, el Laboratorio de Tecnología Industrial (LTI) cuenta con un sistema de aire comprimido deficiente, se pretende mediante este proyecto realizar el correcto dimensionamiento de la red y sugerir los distintos elementos que la componen, para evitar mover manualmente el compresor hacia los distintos módulos interactivos del laboratorio.

Se considerará para el dimensionamiento y simulación lo siguiente: caudal necesario del aire, pérdidas admisibles de presión, presión de trabajo de los consumidores, elementos de la red, longitud y material de tubería, entre otros.

1.3 Objetivos

❖ Objetivo general

Simular una red de aire comprimido con dos tomas para el laboratorio de Tecnología Industrial de la ESFOT-EPN.

❖ Objetivo específico

- Determinar la demanda de aire comprimido de dos tomas del laboratorio.
- Realizar el diagrama unifilar del sistema.
- Dimensionar el sistema.
- Simular el sistema utilizando el software ANSYS.
- Analizar el comportamiento del sistema utilizando tuberías de diferente material.

2. METODOLOGÍA

2.1 Tipo de investigación

Este proyecto se fundamenta en la investigación aplicada, a fin de lograr el objetivo general, se analiza y se adquiere datos e información de los elementos que conforman una red de distribución de aire comprimido como: compresor, tubería y accesorios, de tal manera que esto aporte a la implementación de un sistema de distribución de aire comprimido dentro del Laboratorio de Tecnología Industrial de la ESFOT.

El campo teórico hace una investigación sobre los distintos métodos de dimensionamiento de tubería, tanto de libros como de catálogos, para entender el funcionamiento de un sistema de distribución de aire comprimido, además, de los conocimientos teóricos sobre el manejo del Diseño Asistido por Computadora AutoCAD y Dinámica de Fluidos Computarizados CFD ANSYS.

2.2 Descripción de metodología usada

En la Figura 2.1 se observa la metodología usada para el desarrollo del presente proyecto. En primer lugar, se investigó sobre los distintos métodos de dimensionamiento de tuberías de aire comprimido utilizando libros y catálogos, luego se desarrolló un caso de estudio de flujo interno de un tubo horizontal, mediante el cual se obtiene valores para comparar entre cada uno de los métodos: Flujo interno con ecuación de Colebrook, Flujo interno con diagrama de Moody, Fórmula propuesta por fabricante Atlas CopCo, Fórmula de Parker propuesta por el fabricante y Uso del Nomograma de Festo [1]–[6].

Se determinó la longitud de la tubería que podría ser instalada en el Laboratorio de Tecnología Industrial (LTI) realizando un diagrama unifilar, se investigó mediante catálogos el consumo de aire de cada una de las unidades que pueden ser parte de la red y los distintos materiales de las tuberías que podrían ser instaladas como: acero, cobre y PVC.

Se realiza el dimensionamiento de la red mediante la fórmula propuesta por el fabricante Atlas CopCo, dimensionando el diámetro inicial de la tubería sin considerar accesorios, dado que se pretende dimensionar una red real, se realiza los cálculos para obtener las longitudes equivalentes de los accesorios y así dimensionar los diámetros reales de la red. Posteriormente, se investiga en catálogos de tuberías, los diámetros internos que ofrecen los distintos fabricantes.

Utilizando el software AutoCAD, se realiza el dibujo del caso de flujo interno de un tubo en 3D, de esta manera se simula mediante el software ANSYS la caída de presión comparando los cálculos de los distintos métodos.

Mediante el software AutoCAD se realiza el dibujo del diagrama unifilar en 3D con los diámetros internos calculados y de catálogos de la tubería de la red de distribución, posteriormente se simula el diseño 3D en el software ANSYS utilizando diferentes materiales y diámetros.

Realizadas las respectivas simulaciones se obtiene el valor de la caída de presión mediante su simulación y con los cálculos realizados se compara el valor mediante una tabla de datos.

Observando el comportamiento del fluido en la simulación a través distintos materiales tales como: acero, cobre, policloruro de vinilo (PVC), se obtiene los valores distintos de caída de presión y de esta manera se compara los mismos para obtener el material óptimo a ser utilizado.



Figura 2.1 Esquema de la metodología utilizada
Fuente: Propia

3. RESULTADO Y DISCUSIÓN

3.1 Fundamentos teóricos

Los conceptos desarrollados en esta sección se basan en: Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones de Yunus A. Çengel, Pneumatic Basic Level de Festo, Mecánica de Fluidos de Robert L. Mott, Manual de Aire Comprimido de Atlas CopCo y Neumática Práctica de Nicolás A. Serrano [2]–[6].

- **Comportamiento de los fluidos**

- Flujo laminar: Los fluidos laminares se caracterizan por su movimiento ordenado dentro de la tubería, se puede observar cómo líneas ordenadas que se deslizan una junto a la otra mediante el movimiento, como se muestra en la Figura 3.1.

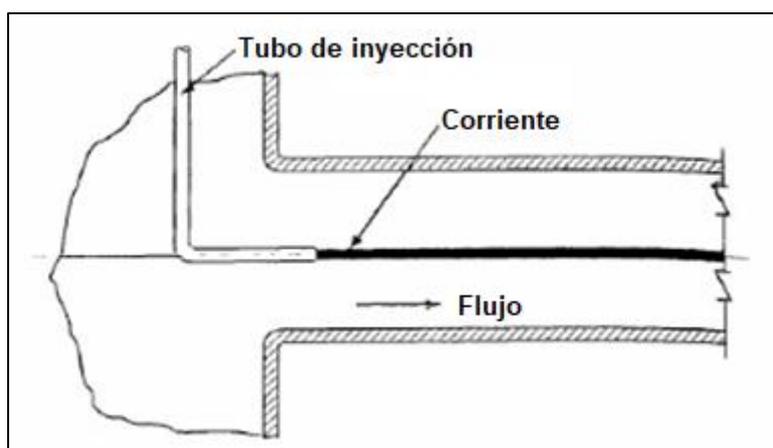


Figura 3.1 Flujo laminar
Fuente: [5]

- Flujo turbulento: Los flujos turbulentos se caracterizan por sus movimientos desordenados y caóticos, en el los cuales existen cantidades significativas de partículas de fluido que se entremezclan provocando un aumento en la velocidad, como se muestra en la Figura 3.2.

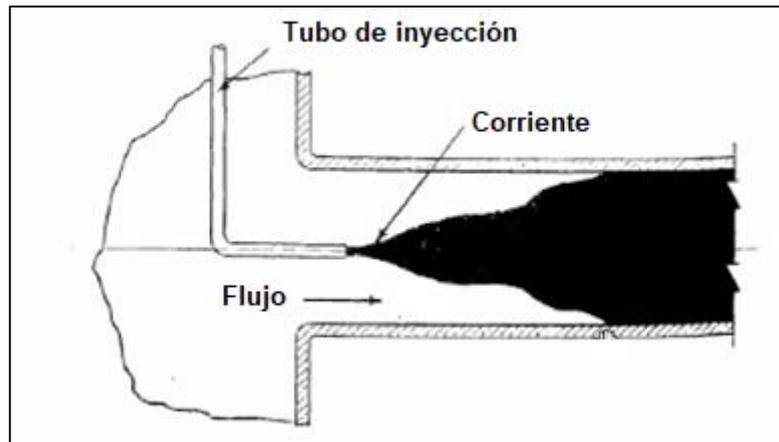


Figura 3.2 Flujo turbulento
Fuente: [5]

- Número de Reynolds: Es un proceso para predecir si un fluido está en régimen laminar o turbulento sin realmente observarlo, tomando en cuenta la fórmula (Ec. 1). Cuando los números se encuentran debajo del valor de 2300 se considera régimen laminar y cuando se encuentran sobre el valor de 4000 se considera régimen turbulento.

$$Re = \frac{Vel * \phi * \rho}{\mu} \quad \text{Ec. 1}$$

Siendo:

- Re : Número de Reynolds (adimensional).
- ρ : Densidad del fluido (kg/m^3).
- Vel : Velocidad del fluido (m/s).
- μ : Viscosidad dinámica del fluido ($Pa * s$).
- ϕ : Diámetro (m).
- Ley de los Gases Ideales: Es la combinación de la Ley de Boyle-Marriott, Ley de Charles y Ley de Gay-Lussac, que resulta en la relación de las propiedades de presión, volumen y temperatura de dos puntos distintos de un sistema.

$$\frac{P_1 * V_1}{T_1} = \frac{P_2 * V_2}{T_2} \quad \text{Ec. 2}$$

Siendo:

- P : Presión (Pa)
- V : Volumen (m^3)
- T : Temperatura (K)

- Ecuación de Estado del Gas Ideal: Es la ecuación más simple y sencilla que relaciona presión, volumen específico o densidad, con la constante de los gases ideales y temperatura; mediante esta simple relación se puede obtener las propiedades de un gas ideal.

$$Pv = RT \quad \text{Ec. 3}$$

$$P = \rho RT \quad \text{Ec. 4}$$

Siendo:

- P : Presión absoluta (kPa)
- v : Volumen específico (m^3 / kg)
- R : Constante de los gases ideales para el aire ($0.287 \text{ kPa} \cdot m^3 / kg \cdot K$)
- T : Temperatura (K)
- ρ : Densidad (kg/m^3)

- **Propiedades de los fluidos**

- Presión: La fuerza que ejerce un fluido sobre una superficie, sea esta de cualquier geometría y material. Existen distintas presiones referidas al nivel del mar, como se muestra en la Figura 3.3.
 - Presión absoluta: Es la presión referenciada al cero absoluto o al vacío.
 - Presión atmosférica: Es la fuerza que ejerce la atmósfera sobre la superficie terrestre siendo esta un valor de 1 (bar) a nivel del mar y 0.72 (bar) a nivel de Quito.

- Presión manométrica: Es la diferencia entre la presión absoluta que existe dentro de una tubería y la presión atmosférica.

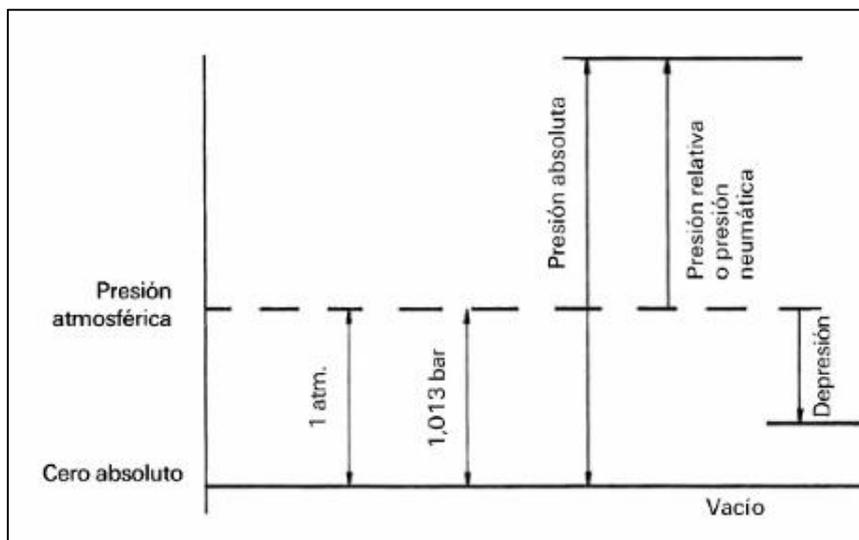


Figura 3.3 Tipos de presiones referidos a nivel del mar
Fuente: [4]

- Velocidad: Es el cambio de posición y movimiento con respecto al estado estacionario o reposo.
- Caudal: Es el volumen del fluido que atraviesa una sección de la tubería en un tiempo determinado.
 - Q_{FAD} (aire libre suministrado): Es la conversión de unidades de caudal de condiciones normales (298 K y 1.00 atm) a caudal con condiciones de entrada estándares (a presión y una temperatura determinadas) [2]

$$Q_{FAD} = Q_{NL/s} * \frac{273 + T}{273} * \frac{1.013}{P_{Altitud}} \quad \text{Ec. 5}$$

Siendo:

- Q_{FAD} : Caudal del sistema en Aire Libre Suministrado (FAD o L/s).
- $Q_{NL/s}$: Caudal normal del compresor (NL/s).
- $P_{Altitud}$: Presión donde se encuentra ubicado el compresor (bar).
- T : Temperatura ($^{\circ}C$).

- Viscosidad: Es la fuerza que se requiere para que un fluido se deslice sobre una superficie.
- Densidad: Es la cantidad de masa que tiene un fluido con respecto a su volumen.
- Temperatura: Es la magnitud física que permite medir la energía cinética de las moléculas, en este caso aire.

- **Pérdidas mayores**

- Caída de presión: Es la diferencia entre la presión de entrada y de salida dentro de un sistema por el cual circula un fluido, como se muestra en la Figura 3.4.

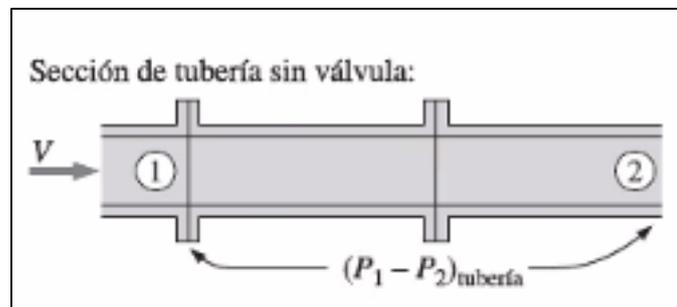


Figura 3.4 Caída de presión en tubería horizontal
Fuente: [6]

- Fricción: Es la fuerza que tiene que vencer el fluido en contacto con una superficie no lisa, como se muestra en la Figura 3.5.

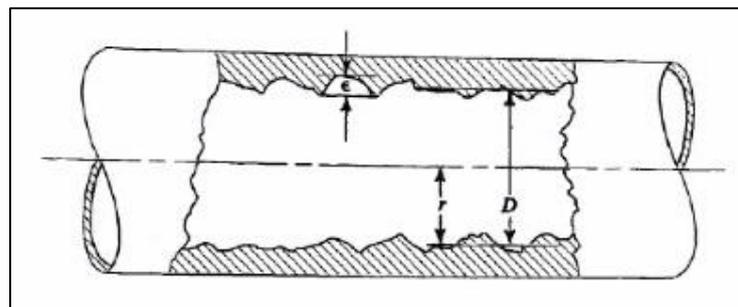


Figura 3.5 Fricción dentro de un tubo
Fuente: [5]

- **Pérdidas menores**

Es la pérdida de carga provocada por un accesorio (codos, tee, válvulas, transiciones, reducciones, uniones, entre otros) por el cual circula un fluido, esto puede ser expresado por una longitud equivalente dependiendo el tipo de accesorio, como se muestra en un ejemplo de una válvula en la Figura 3.6.

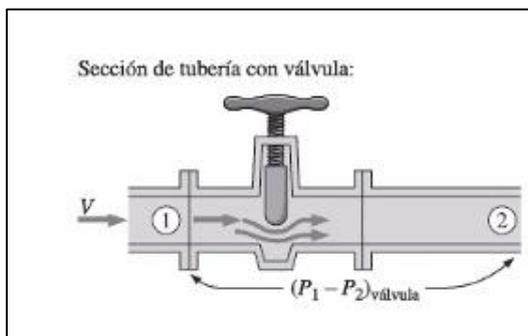


Figura 3.6 Caída de presión en una tubería horizontal con una válvula
Fuente: [6]

- **Compresor**

Es una turbomáquina que permite aumentar la presión de un fluido, solo se permite trabajar con fluidos compresibles como el aire, argón y otro tipo de gases, existen de diferentes tipos como, por ejemplo: de membrana, de pistones, de paletas, turbocompresores y de tornillo.

- **Compresor de pistón**

En la Figura 3.7 se muestra un compresor de pistón. Su funcionamiento es similar al de un motor de combustión interna, pero sin ningún tipo de explosión, es movido mecánicamente por un motor eléctrico que tiene un eje solidario a una manivela que acciona mediante una biela, un pistón que produce un movimiento alternativo comprimiendo el fluido y aumentando su presión.



Figura 3.7 Compresor de pistón
Fuente: [7]

- **AutoCAD**

Es un software para diseño asistido por computadora creado por AUTODESK para la creación de esquemas geométricos precisos para ingeniería, arquitectura, diseño eléctrico, entre otras aplicaciones. Su diseño se lo realiza a través de modelado 2D y 3D [8]

- **CFD (Computational Fluid Dynamic)**

Es un método mediante el cual se puede observar el comportamiento de un fluido, proporcionando información necesaria para poder analizar y dimensionar correctamente un sistema.

- **ANSYS**

ANSYS es una empresa creada en 1970 que tiene un software homónimo, el cual permite realizar el análisis y simulación de fluidos, materiales, transferencia de calor, campos electromagnéticos, entre otros [9].

3.2 Análisis de métodos para dimensionamiento de tuberías de aire comprimido

Para realizar un correcto dimensionamiento de las tuberías y compararlo con los resultados de la simulación obtenida mediante el software ANSYS, se debe verificar que los

métodos tengan resultados parecidos o que el error entre ellos sea lo mínimo posible, de esta manera se puede verificar el correcto dimensionamiento del diámetro de la tubería.

En primer lugar, se plantea un caso de estudio para determinar la caída de presión de una tubería horizontal de aire comprimido y se lo resolverá utilizando distintos métodos de dimensionamiento de redes de aire, usando como material de tubería acero galvanizado y los datos para el caso de flujo interno. Como se muestra en la Figura 3.8.

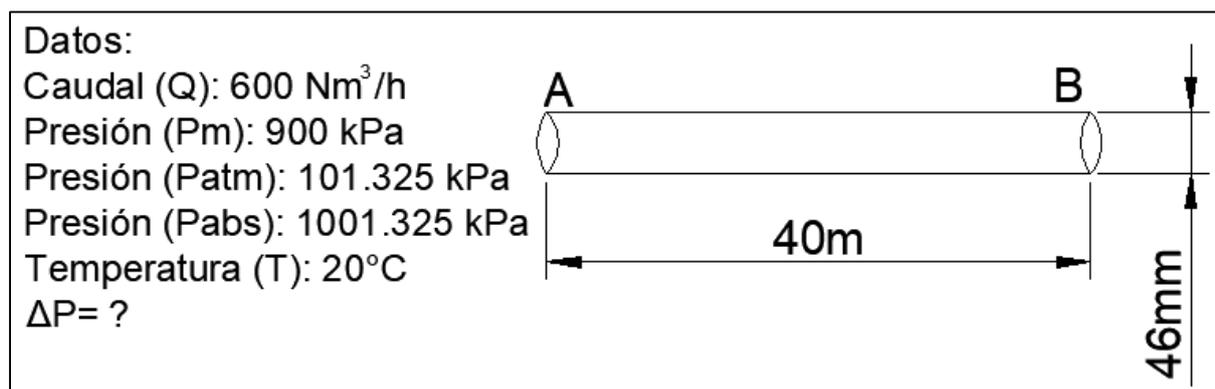


Figura 3.8 Diagrama de caso de flujo interno
Fuente: Propia

Mediante este ejercicio, se determina los valores de caída de presión (ΔP) para cada uno de los métodos investigados, de esta manera se analiza la mejor opción que se acople al dimensionamiento de la red para el Laboratorio de Tecnología Industrial (LTI). Los métodos investigados son los siguientes:

- Método A. Flujo interno con ecuación de Colebrook [6].
- Método B. Flujo interno con diagrama de Moody [6].
- Método C. Fórmula propuesta por el fabricante Atlas CopCo [2].
- Método D. Fórmula de Parker propuesta por el fabricante [10].
- Método E. Uso del Nomograma de Festo [3].

• Método A. Flujo interno con ecuación de Colebrook

Existen dos métodos para el dimensionamiento de tuberías dentro del libro de Mecánica de Fluidos de Yunus A. Çengel, mediante la fórmula de Colebrook o mediante el diagrama de Moody para poder de esta manera obtener el coeficiente de fricción (f). Se utilizan las fórmulas de mecánica de fluidos a presión absoluta, para obtener los parámetros necesarios mediante los cuales se utiliza la ecuación de Colebrook (solamente si el número de Reynolds arroja un valor dentro del régimen turbulento) para así obtener el coeficiente de fricción y utilizarlo en la fórmula de caída de presión en función del factor de fricción.

Se inicia transformando el caudal a presión del sistema utilizando la fórmula de conversión de caudal normal a caudal del sistema (Ec. 6), así obteniendo el caudal que circula por la tubería. Además, se obtiene la velocidad mediante la fórmula de flujo volumétrico (Ec. 7).

El caudal normal se refiere a el caudal de aire que existe en el ambiente a una temperatura de 25 (°C) (298 K) y a una presión de 1 (atm) (101.325 kPa). Para poder utilizar dentro de un sistema de aire comprimido es necesario transformar este caudal normal a caudal dentro del sistema, mediante la relación de presiones.

$$Q_{real} = Q_{normal} * \left(\frac{P_{normal}}{P_{Sistema}} \right) \quad \text{Ec. 6}$$

$$Q_{real} = 0.1667 \left(\frac{Nm^3}{s} \right) * \left(\frac{101325 (Pa)}{1001325 (Pa)} \right)$$

$$Q_{real} = 0.01686 (m^3/s)$$

Siendo:

- Q_{normal} : Caudal en metros cúbicos normales sobre segundo (Nm^3/s).
- Q_{real} : Caudal corregido (m^3/s).
- $P_{atmosférica}$: La presión del lugar donde se encuentra el compresor (Pa).
- $P_{Sistema}$: Presión absoluta a la cual trabaja el sistema (Pa).

$$Q_{real} = A * Vel \quad \text{Ec. 7}$$

$$Vel = \frac{Q_{real}}{A}$$

$$Vel = \frac{0.01686 (m^3/s)}{0.001662 (m^2)}$$

$$Vel = 10.15 (m/s)$$

Siendo:

- Q_{real} : Caudal corregido (m^3/s).
- A : Área (m^2).
- Vel : Velocidad (m/s).

A continuación, se utiliza la ecuación de los gases ideales para obtener el parámetro densidad (ρ) (Ec. 4), se ha obtenido mediante tablas el valor de la viscosidad dinámica a la temperatura del gas (aire) siendo $\mu = 18,25 \times 10^{-6} (Pa * s)$ [6]. Obtenidos ambos parámetros

se utiliza la fórmula del número de Reynolds (Ec. 1), para saber si el fluido se encuentra en régimen laminar o turbulento.

Obteniendo la respuesta de la Ec. 1, debido a los valores altos de velocidad y caudal, por las tuberías de aire comprimido se considera régimen turbulento, ya que el número de Reynolds será mayor a 4000.

Se busca rugosidad absoluta de la tubería (ε) en tablas de la bibliografía en función del material de la misma, en este caso se utilizará la rugosidad absoluta del acero galvanizado proporcionada por el libro de Haestad Methods [11], con el valor de 0.11 (mm), de esta manera se podrá obtener la rugosidad relativa (ε_r), que posteriormente se utiliza en la ecuación de Colebrook (Ec. 9) para determinar el factor de fricción. La ecuación no es lineal y es difícil su resolución, por lo tanto, se debe resolverla de forma iterativa, de forma gráfica con el diagrama Moody o utilizando un software de apoyo.

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\emptyset}$$

$$\varepsilon_r = \frac{0.11 \text{ (mm)}}{46 \text{ (mm)}}$$

$$\varepsilon_r = 0.002391$$
Ec. 8

Siendo:

- ε_r : Rugosidad relativa (adimensional).
- ε : Rugosidad absoluta (mm).
- \emptyset : Diámetro interno de la tubería (mm).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 * \log \left(\frac{\varepsilon_r}{3.7} + \frac{2.51}{Re * \sqrt{f}} \right)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 * \log \left(\frac{0.002391}{3.7} + \frac{2.51}{304354 * \sqrt{f}} \right)$$
Ec. 9

Siendo:

- f : Fricción del material (adimensional).
- Re : Número de Reynolds (adimensional).
- ε_r : Rugosidad relativa (adimensional)

Nota: Esta ecuación solo puede ser utilizada en caso de que el flujo sea turbulento ($Re > 4000$).

Una vez que se ha determinado el factor de fricción, utilizando los demás parámetros ya calculados previamente, se obtiene un resultado de la caída de presión que existirá en el sistema.

$$\Delta P = f * \frac{L}{\emptyset} * \frac{\rho * Vel^2}{2} \quad \text{Ec. 10}$$

$$\Delta P = 0.02511 * \frac{40 (m)}{0.046 (m)} * \frac{11.9 (kg/m^3) * (0.15 m/s)^2}{2}$$

$$\Delta P = 13383 (Pa)$$

Siendo:

- ΔP : Caída de presión en el sistema (Pa).
- f : Factor de fricción (adimensional).
- ρ : Densidad del fluido (kg/m^3).
- \emptyset : Diámetro interno de la tubería (m).
- L : Longitud de la tubería (m).
- Vel : Velocidad del fluido (m/s).

Dando como resultado calculado $\Delta P = 13383 (Pa) = 0.133 (bar)$. Como se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Resultados del Método A

Parámetro	Resultado	Parámetro	Resultado
Área (A)	0.001662 (m ²)	Número de Reynolds (Re)	304354 (adm)
Velocidad (Vel)	10.15 (m/s)	Rugosidad relativa (ϵr)	0.002391 (adm)
Caudal Sistema (Q_{real})	0.01687 (m ³ /s)	Coeficiente de Fricción (f) mediante ecuación de Colebrook	0.02511 (adm)
Densidad (ρ)	11.9 (kg/m ³)	Caída de presión (ΔP)	13383 (Pa) = 0.133 (bar)

Fuente: Propia

- **Método B. Flujo interno con diagrama de Moody.**

Existe otro método para poder dimensionar una red de aire comprimido, en este caso el coeficiente de fricción (f) será tomado a través del diagrama de Moody y de esta manera obtener su valor, para poder utilizarlo en la fórmula de caída de presión (Ec. 10). Utilizando las ecuaciones (Ec. 1, Ec. 4, Ec. 6, Ec. 8) se obtienen los parámetros necesarios para el uso del diagrama de Moody, como se muestra en la Figura 3.9.

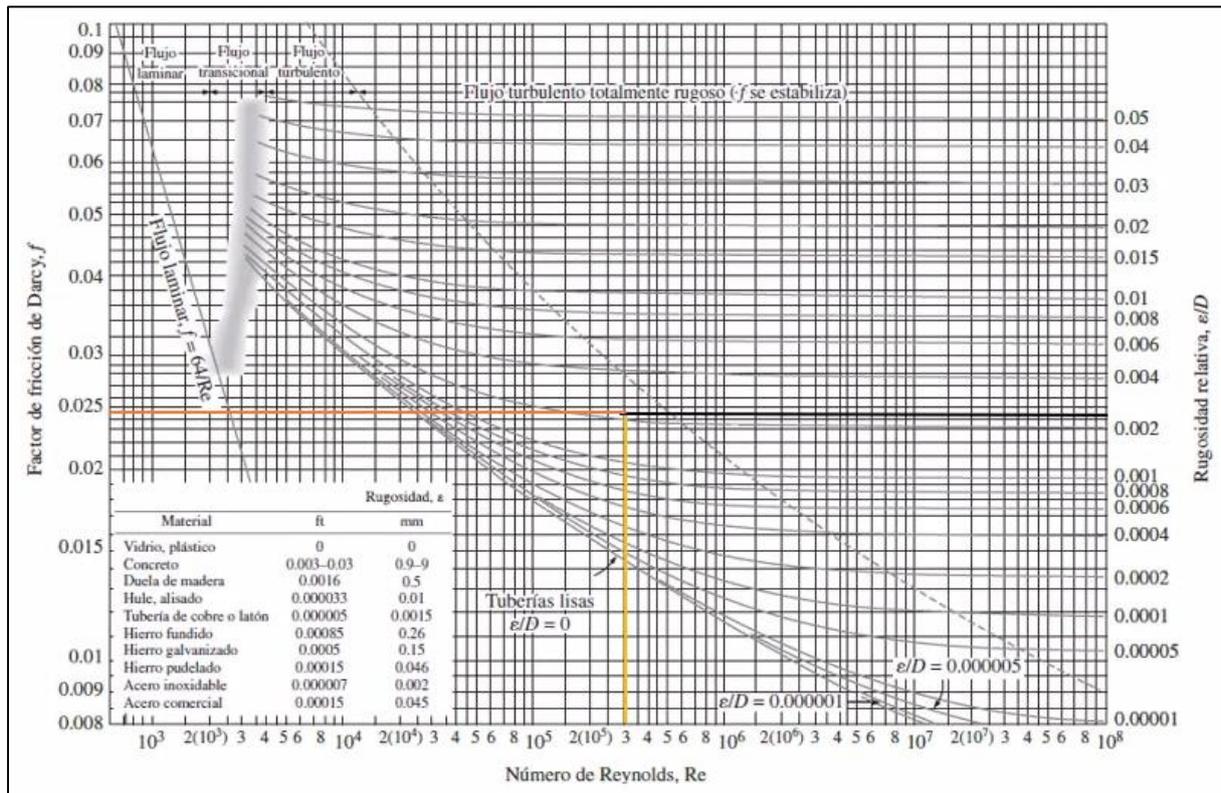


Figura 3.9 Diagrama de Moody
Fuente: [6]

La fricción da como resultado: $f \approx 0.0239$ (*adimensional*).

Utilizando la fórmula de caída de presión de Yunus A. Çengel (Ec. 10). se obtiene como resultado una caída de presión: $\Delta P = 12743$ (Pa) = 0.12743 (bar), como se muestra en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Resultados del Método B

Parámetro	Resultado	Parámetro	Resultado
Área (A)	0.001687 (m ²)	Número de Reynolds (Re)	304354 (adm)
Velocidad (Vel)	10.15 (m/s)	Rugosidad relativa (ϵr)	0.0023913 (adm)
Caudal Sistema (Q_{real})	0.01687 (m ³ /s)	Coefficiente de Fricción (f) mediante el diagrama de Moody	0.0239 (adm)
Densidad (ρ)	11.9 (kg/m ³)	Caída de presión (ΔP)	12743 (Pa) = 0.12743 (bar)

Fuente: Propia

- **Método C. Fórmula propuesta por el fabricante Atlas CopCo**

Atlas CopCo es una empresa que se dedica a la instalación y dimensionamiento de tuberías para uso neumático. Este fabricante mediante el manual de aire comprimido indica como dimensionar una red paso a paso, tomando en cuenta la altura donde está el compresor, la temperatura del medio ambiente donde se va a instalar el compresor, las longitudes equivalentes de cada accesorio y el caudal que va a circular dentro de la tubería.

Utilizando las fórmulas que el fabricante sugiere, se dimensiona la red de la siguiente manera:

- Se debe realizar una conversión de unidades de $(\frac{Nm^3}{h})$ a $(\frac{NL}{s})$, y mediante la fórmula que el fabricante nos sugiere transformar de (NL/s) a (L/s) o (FAD) (aire libre suministrado).
- Utilizando la ecuación Ec. 5, se puede obtener el valor del caudal a la altitud a la cual se está trabajando, en este caso se dimensionará a nivel del mar, con un valor 1.00 (bar) de presión y a una temperatura de 20 (°C).
- Mediante la ecuación (Ec. 11) se obtiene el valor de la caída de presión del sistema.

$$\Delta P = 450 * \frac{Q_{FAD}^{1.85} * l}{\varnothing^5 * P} \quad \text{Ec. 11}$$

Siendo:

- ΔP : Caída de presión en el sistema (bar).

- P : Presión absoluta del sistema (bar).
- l : Longitud de la tubería (m).
- \emptyset : Diámetro interno de la tubería (mm).
- Q_{FAD} : Caudal del sistema en Aire Libre Suministrado (FAD o L/s).

Su resolución es de la siguiente manera:

$$Q_{FAD} = 166.7 * \frac{273 + 20}{273} * \frac{1.013}{1.00} = 181.23 \text{ (L/s)}$$

$$\Delta P = 450 * \frac{181.23^{1.85} * 40}{46^5 * 10.01} = 0.1315 \text{ (bar)}$$

Dando como resultado al utilizar la fórmula un valor de $\Delta P = 13150 \text{ (Pa)} = 0.13 \text{ (bar)}$.

- **Método D. Fórmula de Parker propuesta por fabricante**

Parker Hannifin es una empresa que realiza implementos para instalaciones de aire comprimido y accesorios de sistema neumáticos, este fabricante tiene un método específico para poder dimensionar una red de aire comprimido, el método consta de una sola fórmula la cual es la siguiente (Ec. 12):

$$\Delta P = 1.6 \times 10^3 * Q^{1.85} \left(\frac{l}{\emptyset^5 * P_1} \right) \quad \text{Ec. 12}$$

$$\Delta P = 1.6 \times 10^3 * (0.166 \text{ Nm}^3/\text{s})^{1.85} \left(\frac{40 \text{ (m)}}{(0.046 \text{ m})^5 * 900000 \text{ (Pa)}} \right)$$

$$\Delta P = 12552 \text{ (Pa)}$$

Siendo:

- ΔP : Caída de presión en el sistema (Pa).
- P : Presión manométrica del sistema (Pa).
- l : Longitud de la tubería (m).
- \emptyset : Diámetro interno de la tubería (m).
- Q : Caudal del sistema en metros cúbicos normales sobre segundo (Nm³/s).

En la utilización de esta fórmula da un valor de caída de presión: $\Delta P = 12552 \text{ (Pa)} = 0.1255 \text{ (bar)}$.

- **Método E. Uso del Nomograma de Festo.**

Festo es una de las compañías más importantes cuando se habla de aire comprimido, siendo una referente para toda la industria que en sus actividades utiliza aire como fluido de transmisión de potencia. Festo tiene un método para el dimensionamiento de redes de aire comprimido realizándolo a través de un nomograma en el cual mediante líneas podemos encontrar los valores de nuestra red como se muestra en la Figura 3.10.

Para utilizar el nomograma, se debe ubicar los valores en la Figura 3.10. Después se procede a trazar una línea desde el valor de longitud de la tubería (Z) al caudal (Y), la cual se debe extender hasta el eje número 1 (X), luego desde el corte de la línea realizada anteriormente se debe trazar una línea desde el eje 1 (X) hasta el eje 2 (V) cortando en el valor del diámetro nominal (W). Para finalizar, se traza una línea desde el eje (10^2 kPa) (U) siendo esta presión manométrica del sistema, la línea debe pasar por el corte del eje 2 (V) realizado anteriormente hasta su respuesta en eje de pérdida de presión (I).

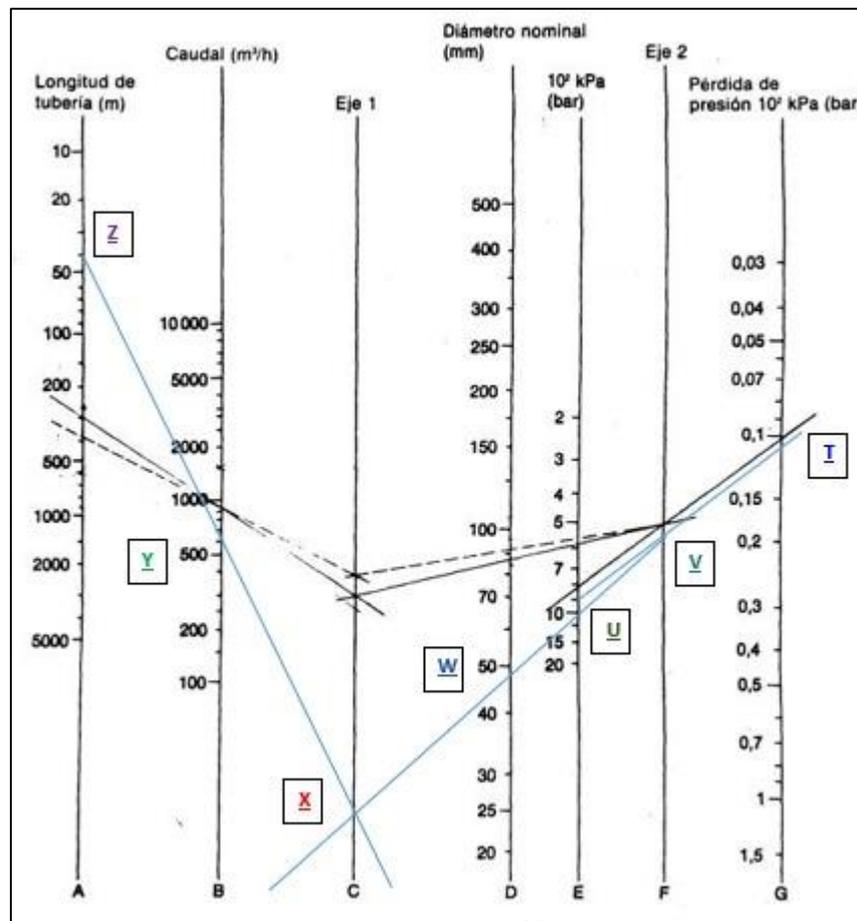


Figura 3.10 Nomograma de Festo

Fuente: [3]

Mediante el nomograma se obtiene el resultado de caída de presión de: $\Delta P = 10800 \text{ (Pa)} = 0.108 \text{ (bar)}$.

- **Diferencias entre cada uno de los métodos**

La Tabla 3.3 presentada a continuación, resume los resultados obtenidos en los distintos métodos, tomando como referencia el Método A (Flujo interno con ecuación de Colebrook) se realizó una comparación.

Tabla 3.3 Comparación de cálculos entre métodos

Método	Valor de caída de presión (bar)	Comparación (%)	Presión usada
Método A	0.13383	0	Absoluta
Método B	0.12743	4.78	Absoluta
Método C	0.1315	1.74	Absoluta
Método D	0.1255	6.22	Manométrica
Método E	0.108	19.3	Manométrica

Fuente: Propia

En la Tabla 3.4 se muestra un cuadro comparativo entre cada uno de los métodos, sobre las ventajas y desventajas.

Tabla 3.4 Ventajas y desventajas de los métodos

Método	Ventaja	Desventaja
Método A	<p>Considera la rugosidad dependiendo el tipo de material. La ecuación toma como elemento principal la fricción que existe entre el material y el fluido. Considera la presión del sistema.</p>	<p>Uso de varias fórmulas. La resolución de la ecuación de Colebrook es demasiado compleja, dado que es una ecuación no lineal y se debe iterar para obtener su respuesta. La rugosidad absoluta se obtiene de otras fuentes especializadas.</p>
Método B	<p>Considera el espesor mediante el tipo de material. La ecuación toma como elemento principal la fricción que existe entre el material y el fluido. Considera la presión del sistema.</p>	<p>Pueden existir errores de percepción visual de los valores, dado que el valor del diagrama utilizado puede variar dependiendo de la persona. Uso de varias fórmulas. La rugosidad absoluta se obtiene de otras fuentes especializadas.</p>

Método C	Considera la altitud donde va a ser instalada la red y la temperatura. Utiliza el caudal que va a circular dentro de la tubería por medio de la Ec. 5.	Se necesita realizar varias transformaciones de unidades para poder utilizar las fórmulas.
Método D	Solo se utiliza una sola fórmula.	No considera el caudal que circula por la red, tampoco la temperatura del fluido. No considera la altitud donde la red va a ser instalada.
Método E	Nomograma de fácil uso.	No considera el caudal que circula por la red, tampoco la temperatura del fluido. No considera la altitud donde la red va a ser instalada. Pueden existir errores de percepción visual de los valores, dado que se utiliza un nomograma.

Fuente: Propia

A continuación, se presenta la Tabla 3.5 con una calificación de parámetros de cada uno de los métodos realizados. Se calificará desde 0 (Calificación más baja) a 5 (Calificación más alta) a cada uno de los parámetros establecidos para poder determinar cuál método es el más recomendado en usar.

Tabla 3.5 Ponderación de métodos

Parámetros	Método	Método	Método	Método	Método
	A	B	C	D	E
Complejidad	1	5	5	5	5
Consideración de altitud y temperatura del fluido	5	5	5	0	0
Información sobre red de tuberías neumáticas	5	5	5	1	5
Información sobre accesorios	5	5	5	0	5
Exactitud	5	3	4.5	3	1
Total	21	23	24.5	9	16

Fuente: Propia

En base a la ponderación realizada de los diferentes métodos, se selecciona el método de Atlas CopCo para el dimensionamiento de la red de aire comprimido, dado que el manual de aire comprimido del fabricante contiene suficiente información sobre el dimensionamiento de red (Accesorios, caídas de presión recomendadas, corrección de cálculo debido a la altitud, etc.) [2].

3.3 Demanda de aire y diagrama unifilar

- **Medición de longitudes de la red**

Se toma mediciones de los puntos de distribución y donde va a ser instalada la red de aire comprimido dentro del Laboratorio de Tecnología Industrial (LTI), así como la distancia desde el compresor hasta cada una de las tomas de alimentación de aire como se muestra en la Figura 3.11 y Anexo A.

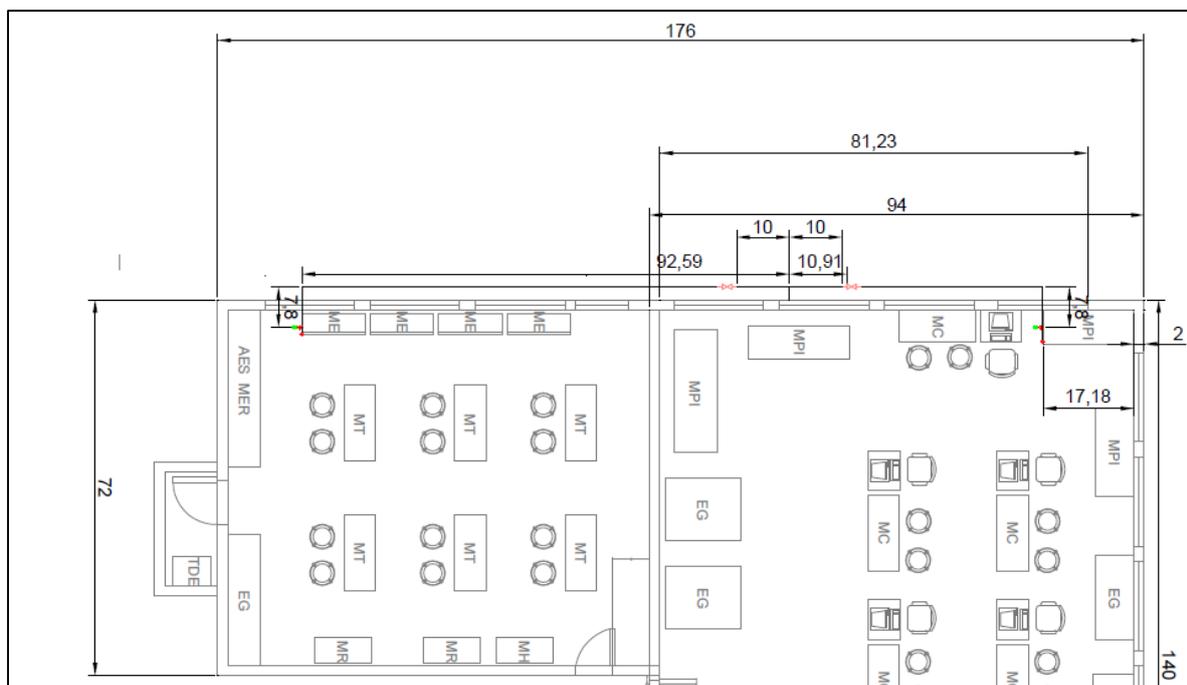


Figura 3.11 Medidas tomadas para el dimensionamiento de la red
Fuente: Propia

- **Diagrama unifilar**

Se procede a realizar los planos y el diagrama unifilar de la red de aire comprimido que se instalará en el Laboratorio de Tecnología Industrial (LTI). Como se muestra en la Figura 3.12 y para más detalles en el Anexo B.

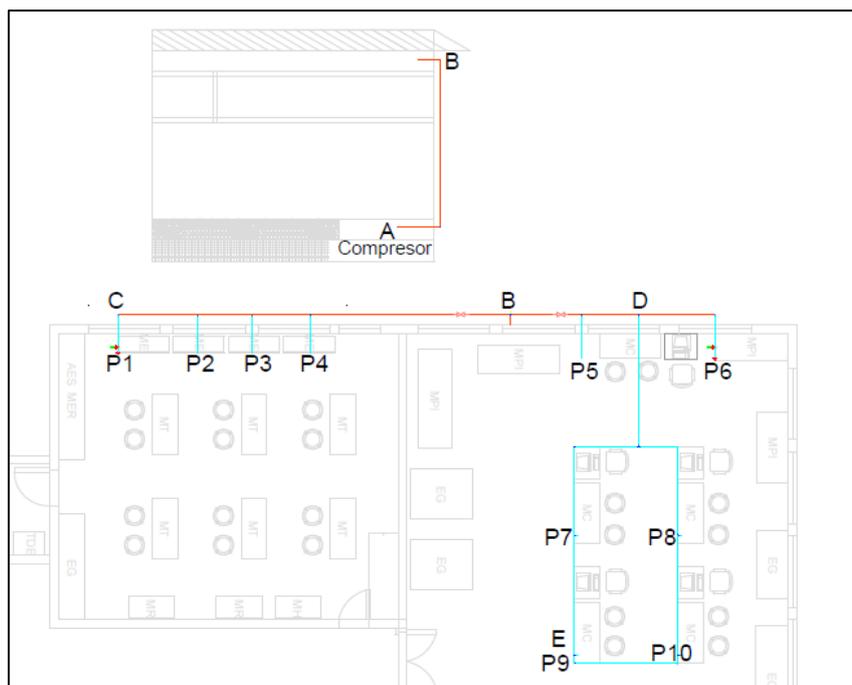


Figura 3.12 Diagrama unifilar propuesto para el Laboratorio (LTI)
Fuente: Propia

- **Cálculo de unidades de consumo**

Una vez realizado el diagrama unifilar se estimaron las unidades de consumo que van a ser parte de la red, con la ayuda de catálogos y tablas se estimó el caudal que va a circular en toda la red. En la Tabla 3.6 se muestran los valores de caudal de los elementos, véase la Figura 3.13 y Anexo B, donde se encuentran distribuidos los elementos utilizados [12]–[14].

Tabla 3.6 Cálculo de unidades de consumo de aire

Descripción o Artículo	Nomenclatura	Presión (bar)	Unidades	Duración de Conexión (%)	Factor de Simultaneidad (%)	Consumo (NL/min)	Total	Conversión (NCFM)
Pistola Neumática	P6	1-6	1	1	1	100	100	3,53
Transductor	P8	1-10	1	1	1	6,48	6,48	0,2288
Transductor	P10	1-10	1	1	1	6,48	6,48	0,2288
Transductor	P7	1-10	1	1	1	6,48	6,48	0,2288
Transductor	P9	1-10	1	1	1	6,48	6,48	0,2288
Banda Transportado x4 cilindros	P5	1-10	4	1	1	12,96	51,84	1,8307
Módulo x3 cilindros	P4	1-10	3	1	1	12,96	38,88	1,3730
Módulo x3 cilindros	P3	1-10	3	1	1	12,96	38,88	1,3730
Módulo x3 cilindros	P2	1-10	3	1	1	12,96	38,88	1,3730
Pistola Neumática	P1	1-6	1	1	1	100	100	3,5314
Total							394.4	13.9281

Fuente: Propia

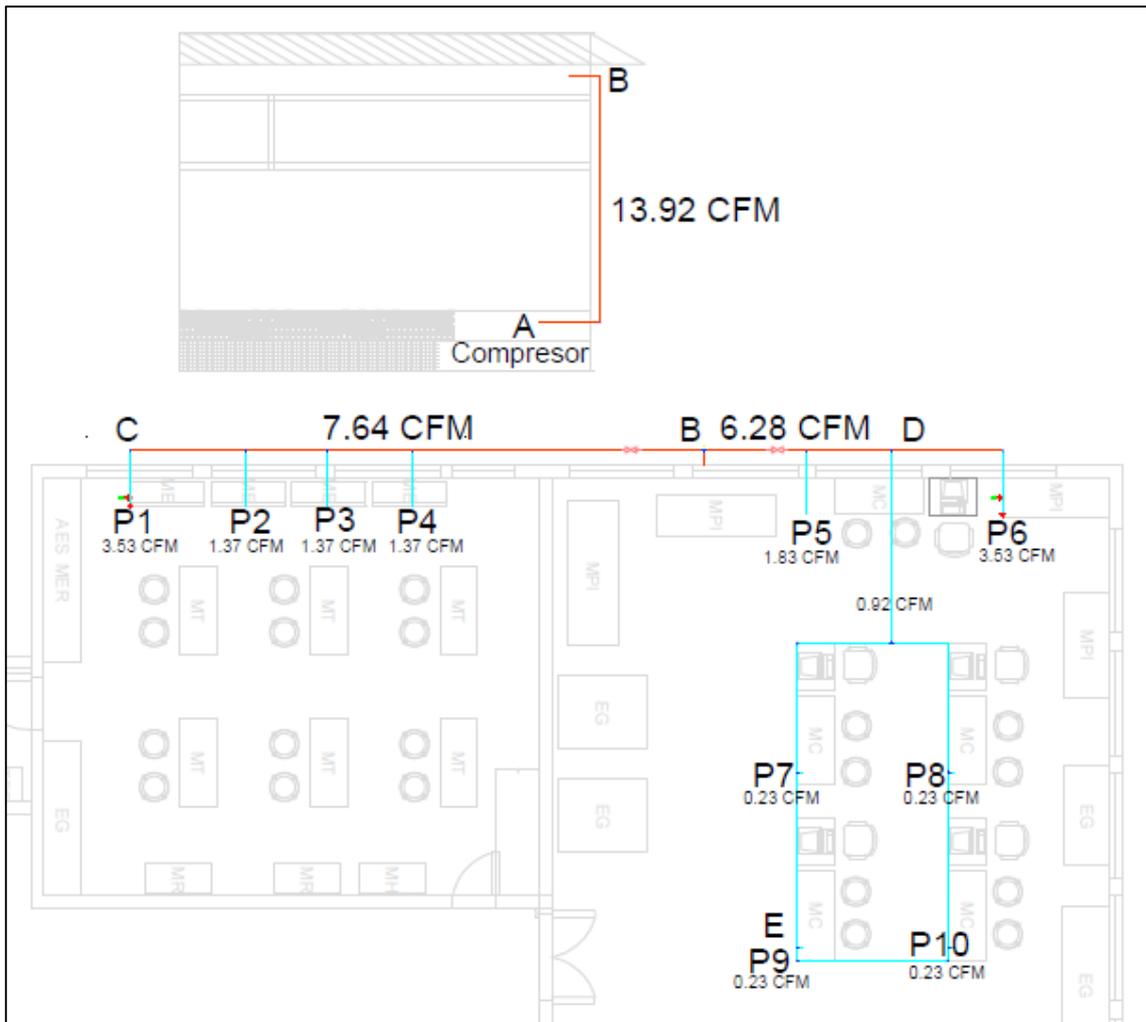


Figura 3.13 Red de aire comprimido tubería completa
Fuente: Propia

- **Materiales de la tubería**

Se ha investigado sobre los distintos materiales que son usados comúnmente en las redes de tuberías de aire comprimido, dando como resultado el uso de tuberías de acero, cobre y PVC. Como se muestra en la Figura 3.14, Figura 3.15 y Figura 3.16 [15]–[17].



Figura 3.14 Tubería PVC
Fuente: [15]



Figura 3.15 Tee de Cobre
Fuente: [17]



Figura 3.16 Tubería de acero inoxidable
Fuente: [16]

3.4 Dimensionamiento de la red de aire comprimido

- **Dimensionamiento inicial de las tuberías (sin accesorios)**

Seleccionado el método con el que se trabaja, se realiza el dimensionamiento de los diámetros de los siguientes tramos: A-B, B-C, B-D y D-E de la tubería que componen la red.

El valor de caudal total de las unidades de consumo (tramo principal A-B) es de 13.92 (NCFM) (pies cúbicos por minuto a condiciones normales), las unidades funcionan con una presión de 10 (bar) máximo; asumiendo que en toda la red se obtienen fugas por accesorios, condensados y entre otros, el manual de aire comprimido de Atlas CopCo recomienda sumar 1 (bar) para vencer estas calamidades y al ser presión absoluta se le suma 1 (atm) dando como presión un aproximado de 12 (bar) [2].

Una vez obtenido el caudal y la presión necesaria se realiza el dimensionamiento de la red para de esta manera obtener el diámetro interno de las tuberías, en este caso se tomará el tramo A-B como ejemplo de cálculo. Los siguientes datos son del tramo A-B de la red propuesta, utilizando el acero como material de tubería:

- Caudal(Q): 13.92 (NCFM)
- Longitud del tramo A-B (l): 5 (m)
- Presión absoluta (P): 12 (bar)
- Caída de presión recomendada por fabricante (ΔP): 0.015 (bar) [2].

- Altitud ($P_{altitud}$): 0.72 (bar)
- Temperatura (T): 20 (°C)

Con los datos mencionados se procederá a realizar los cálculos, utilizando las siguientes ecuaciones (Ec. 5, Ec.13):

$$Q_{NL/s} = 13.92 (NCFM) * \frac{0.471947 (NL/s)}{1 (NCFM)} \quad \text{Ec.13}$$

$$Q_{NL/s} = 6.5694 (NL/s)$$

$$Q_{FAD} = Q_{NL/s} * \frac{273 + T}{273} * \frac{1.013}{P_{Altitud}}$$

$$Q_{FAD} = 6.5694 * \frac{273 + 20}{273} * \frac{1.013}{0.72}$$

$$Q_{FAD} = 9.92 (FAD)$$

Obtenido el caudal se procede a despejar el diámetro de la siguiente fórmula (Ec. 14):

$$\Delta P = 450 * \frac{Q_{FAD}^{1.85} * l}{\emptyset^5 * P} \quad \text{Ec. 14}$$

$$\emptyset = \sqrt[5]{450 * \frac{Q_{FAD}^{1.85} * l}{\Delta P * P}}$$

$$\emptyset = \sqrt[5]{450 * \frac{9.92^{1.85} * 5}{0.015 * 12}}$$

$$\emptyset = 15.42 (mm)$$

Después de calcular el tramo A-B se procede a calcular el diámetro de cada uno de los tramos, como se muestra en la Tabla 3.7, los tramos se muestran en la Figura 3.12.

Tabla 3.7 Diámetros calculados sin accesorios

Tramo	Caudal (Q_{FAD})	Longitud (m)	Presión (bar)	Caída de Presión (bar)	Diámetro (mm)
A-B	9.92	5	12	0.015	15.42
B-D	4.475	4.9	12	0.015	11.44
B-C	5.44	9.25	12	0.015	13.967
D-E	0.65	1	12	0.015	4.09

Fuente: Propia

- **Dimensionamiento de las tuberías considerando accesorios**

Tomando en cuenta que en una red real se tiene varios accesorios instalados, para obtener la pérdida de carga de cada uno de los accesorios se debe proseguir mediante longitudes equivalentes, por lo tanto, se debe realizar nuevamente los cálculos para obtener el diámetro real de la tubería.

Utilizando la tabla de la Figura 3.17 se obtienen los valores de las longitudes equivalentes de los siguientes accesorios de tramo A-B:

Component		Inner pipe diameter in mm (d)										
		25	40	50	80	100	125	200	250	250	300	400
Ball valve (full flow)		0.3 5	0.5 8	0.6 10	1.0 16	1.3 20	1.6 25	1.9 30	2.6 40	3.2 50	3.9 60	5.2 80
Diaphragm valve fully open		1.5	2.5	3.0	4.5	6	8	10	-	-	-	-
Angle valve fully open		4	6	7	12	15	18	22	30	36	-	-
Poppet valve		7.5	12	15	24	30	38	45	60	-	-	-
Flap check valve		2.0	3.2	4.0	6.4	8.0	10	12	16	20	24	32
Elbow R = 2d		0.3	0.5	0.6	1.0	1.2	1.5	1.8	2.4	3.0	3.6	4.8
Elbow R = d		0.4	0.6	0.8	1.3	1.6	2.0	2.4	3.2	4.0	4.8	6.4
90° angle		1.5	2.4	3.0	4.5	6.0	7.5	9	12	15	18	24
Tee through-flow		0.3	0.4	1.0	1.6	2.0	2.5	3	4	5	6	8
Tee side-flow		1.5	2.4	3.0	4.8	6.0	7.5	9	12	15	18	24
Reducing nipple		0.5	0.7	1.0	2.0	2.5	3.1	3.6	4.8	6.0	7.2	9.6

Figura 3.17 Tabla de longitudes equivalentes

Fuente: [2]

A continuación, se realiza los cálculos de las longitudes equivalentes del tramo A-B como se muestra en la Tabla 3.8.

- Tramo: A-B

Tabla 3.8 Longitudes equivalentes tramo A-B

Accesorio (25 mm)	Unidades	Longitud Equivalente (m)	Total (m)
Válvula de bola (Full Flow)	1	5	5
T (Tee side-flow)	1	1.5	1.5
Codos (Elbow R)	2	0.4	0.8
Longitud equivalente Total (leq)			7.3

Fuente: Propia

Obtenida la sumatoria de los accesorios por medio de longitudes equivalentes se le suma a la longitud (l) para obtener el valor real de la longitud de la tubería (l_t), utilizando la ecuación Ec. 15.

$$l_t = l + leq \quad \text{Ec. 15}$$

$$l_t = 5 + 7.3$$

$$l_t = 12.3 \text{ (m)}$$

Se realiza los cálculos para el diámetro de la tubería, utilizando la ecuación Ec. 14.

$$\Delta P = 450 * \frac{Q_{FAD}^{1.85} * l_t}{\emptyset^5 * P} \quad \text{Ec. 14}$$

$$\emptyset = \sqrt[5]{450 * \frac{Q_{FAD}^{1.85} * l_t}{\Delta P * P}}$$

$$\emptyset = \sqrt[5]{450 * \frac{9.92^{1.85} * 12.3}{0.015 * 12}}$$

$$\emptyset = 18.46 \text{ (mm)}$$

En las siguientes tablas (Tabla 3.9 y Tabla 3.10) se muestran los valores de las longitudes equivalentes por tramos.

- Tramo: B-D

Tabla 3.9 Longitudes equivalentes tramo B-D

Accesorio (25 mm)	Unidades	Longitud Equivalente (m)	Total (m)
Válvula de bola (Full Flow)	1	5	5
T (Tee side-flow)	2	1.5	3
Codos (Elbow R)	1	0.4	0.4
Longitud equivalente Total (leq)			8.4

Fuente: Propia

- **Tramo: B-C**

Tabla 3.10 Longitudes equivalentes tramo B-C

Accesorio (25 mm)	Unidades	Longitud Equivalente (m)	Total (m)
Válvula de bola (Full Flow)	1	5	5
T (Tee side-flow)	3	1.5	4.5
Codos (Elbow R)	1	0.4	0.4
Longitud equivalente Total (leq)			9.9

Fuente: Propia

- **Tramo: D-E**

Tabla 3.11 Longitudes equivalentes tramo D-E

Accesorio (25 mm)	Unidades	Longitud Equivalente (m)	Total (m)
Válvula de bola (Full Flow)	0	5	0
T (Tee side-flow)	5	1.5	7.5
Codos (Elbow R)	4	0.4	1.6
Longitud equivalente Total (leq)			9.1

Fuente: Propia

Realizados los respectivos cálculos en la Tabla 3.12, se presentan los valores obtenidos de cada uno de los tramos:

Tabla 3.12 Diámetros calculados con accesorios

Tramo	Caudal (Q_{FAD})	Longitud Total (m)	Presión (bar)	Caída de Presión (bar)	Diámetro (mm)
A-B	9.92	12.3	12	0.015	18.462
B-D	4.475	13.3	12	0.015	13.96
B-C	5.44	19.15	12	0.015	16.15
D-E	0.65	10.1	12	0.015	6.49

Fuente: Propia

- **Tuberías seleccionadas en base a catálogos**

A continuación, se presenta en la Tabla 3.13 los valores de los diámetros internos de la tubería tanto calculados, como seleccionados en los catálogos. Para seleccionar los diámetros internos de la columna 3 (diámetro interno-catálogo) de la Tabla 3.13, se analiza en catálogos de tuberías para de esta manera obtener el diámetro real de la tubería [15]–[18].

Tabla 3.13 Diámetros calculados y escogidos por tramo de tubería

Tramos	Diámetro interno-calculado (mm)	Diámetro interno-catálogo (mm)
A-B	18.462	22.2
B-D	13.96	13.4
B-C	16.15	17.2
D-E	6.49	7.31

Fuente: Propia

A continuación, en la Figura 3.18 se presenta el diagrama unifilar final de la tubería propuesta de la red de distribución de aire comprimido para el Laboratorio de Tecnología Industrial (LTI).

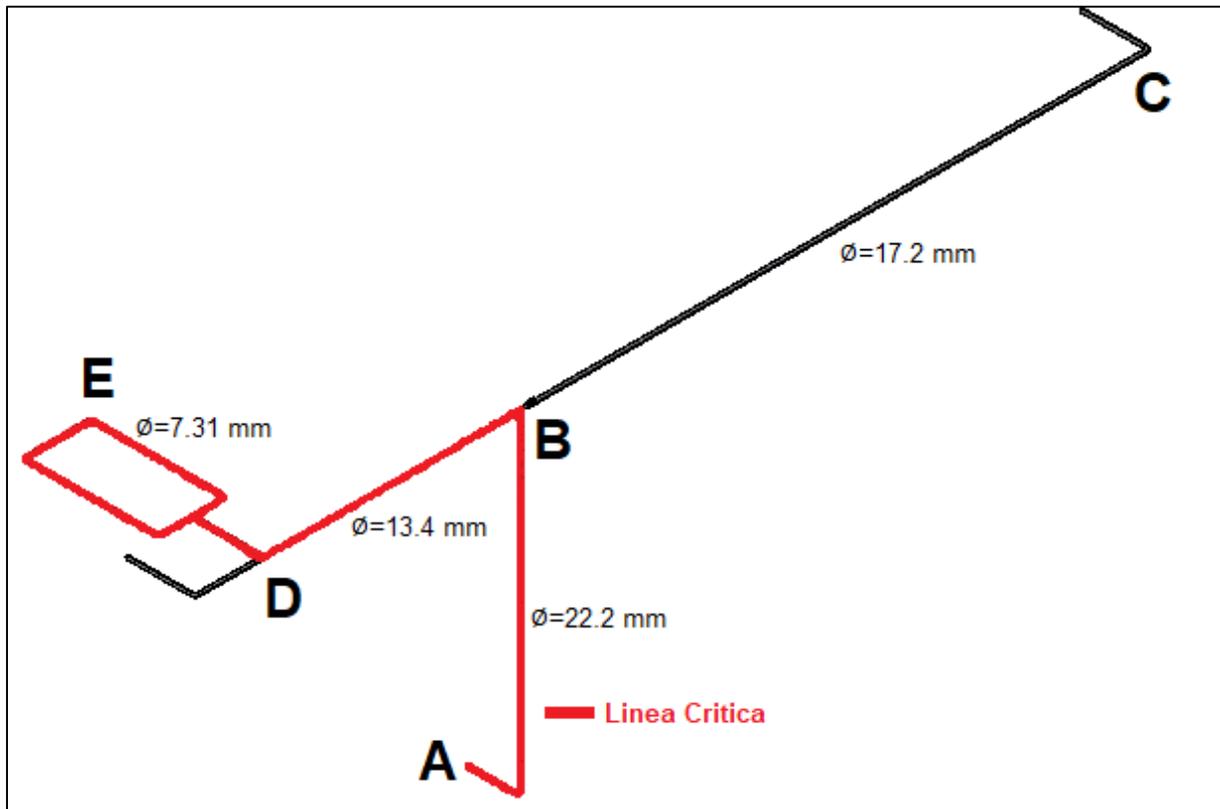


Figura 3.18 Resultado del diagrama unifilar en 3D
Fuente: Propia

3.5 Análisis de la línea crítica del sistema

En la Tabla 3.14 se muestra la sumatoria de la caída de presión de los diámetros de catálogo que corresponde a la línea crítica.

Tabla 3.14 Análisis de la caída de presión en la línea crítica

Tramo	Diámetro (mm)	Caudal (Q_{FAD})	Longitud Total (m)	Presión (bar)	Caída de Presión Real (bar)	Caída de Presión Recomendada (bar)
A-B	22.2	9.92	12.3	12	0.010	0.015
B-D	13.4	4.475	13.3	12	0.018	0.015
D-E	7.31	0.65	10.1	12	0.008	0.015
Total					0.036	0.045

Fuente: Propia

Tomando en cuenta que se dimensiona una red real, los valores de caída de presión se ven afectados por el diámetro escogido en catálogos dado que al aumentar el diámetro del tramo A-B la caída de presión va a disminuir, mientras que en tramo B-D al disminuir el

diámetro la caída de presión aumentará, por lo tanto, la caída de presión pasa de tener un valor de 4.5 (kPa) a 3.6 (kPa).

3.6 Metodología de la simulación en ANSYS

- **Pasos para realizar una simulación en ANSYS Workbench 2020 R1**

Obtenido los valores del ejercicio de la Figura 3.8 se procede a realizar la simulación en ANSYS Workbench 2020 R1. Mediante el software AutoCAD se realiza el dibujo 3D del tubo, el mismo que se importó al software ANSYS para realizar la simulación siguiendo los siguientes pasos, como se muestra en la Figura 3.19.

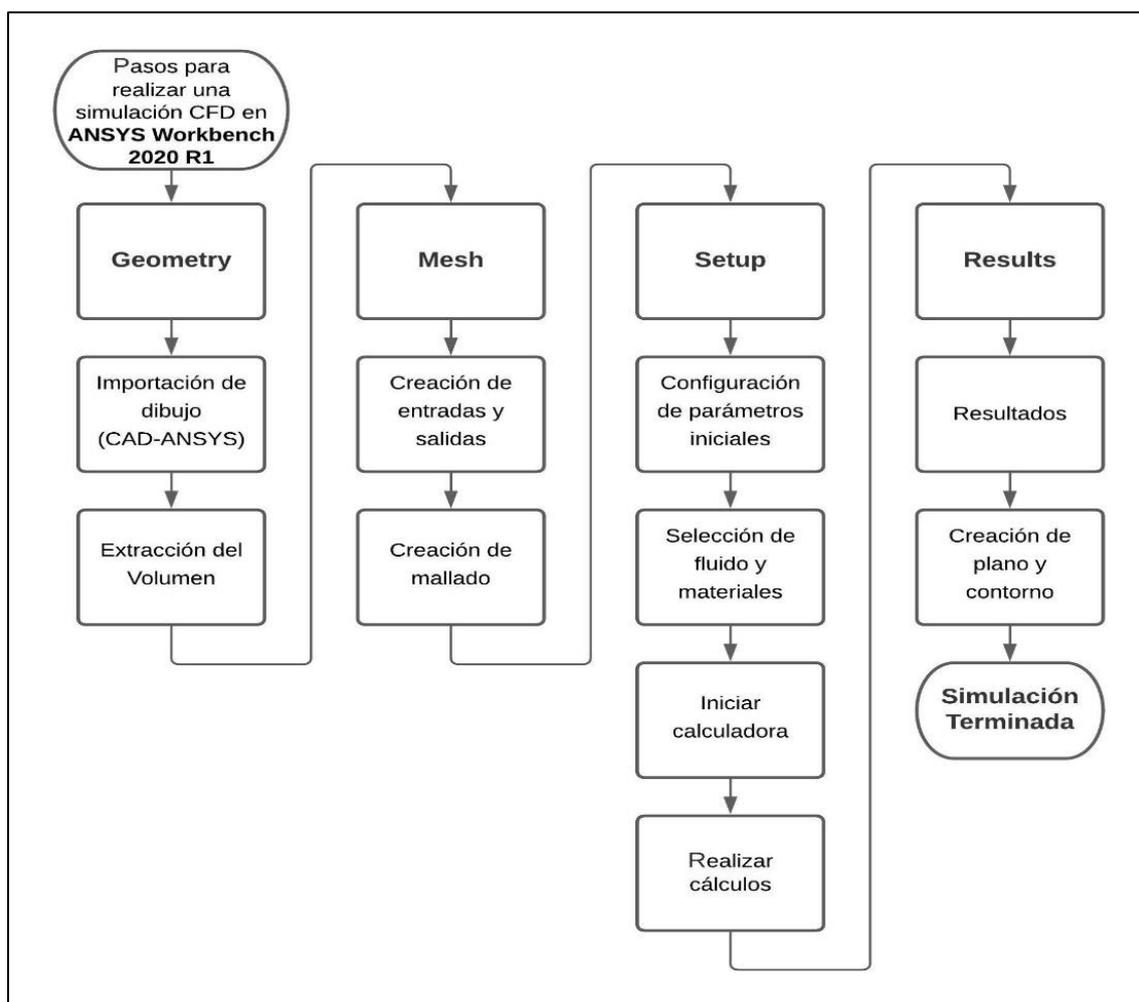


Figura 3.19 Pasos a seguir para una simulación en ANSYS
Fuente: Propia

- **Herramientas del Programa Workbench 2020 R1:**

Mediante el programa **Workbench** de ANSYS, se realizará la simulación de la tubería de aire comprimido, en la Figura 3.20 se muestran las principales herramientas de modelaje y simulación.

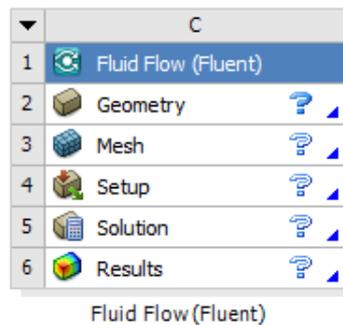


Figura 3.20 Herramientas de Workbench
Fuente: Propia

- **Importación del dibujo 3D (Geometry)**

Para importar un documento realizado en AutoCAD se debe abrir con el programa de ANSYS como se muestra en la Figura 3.21 y Figura 3.22.

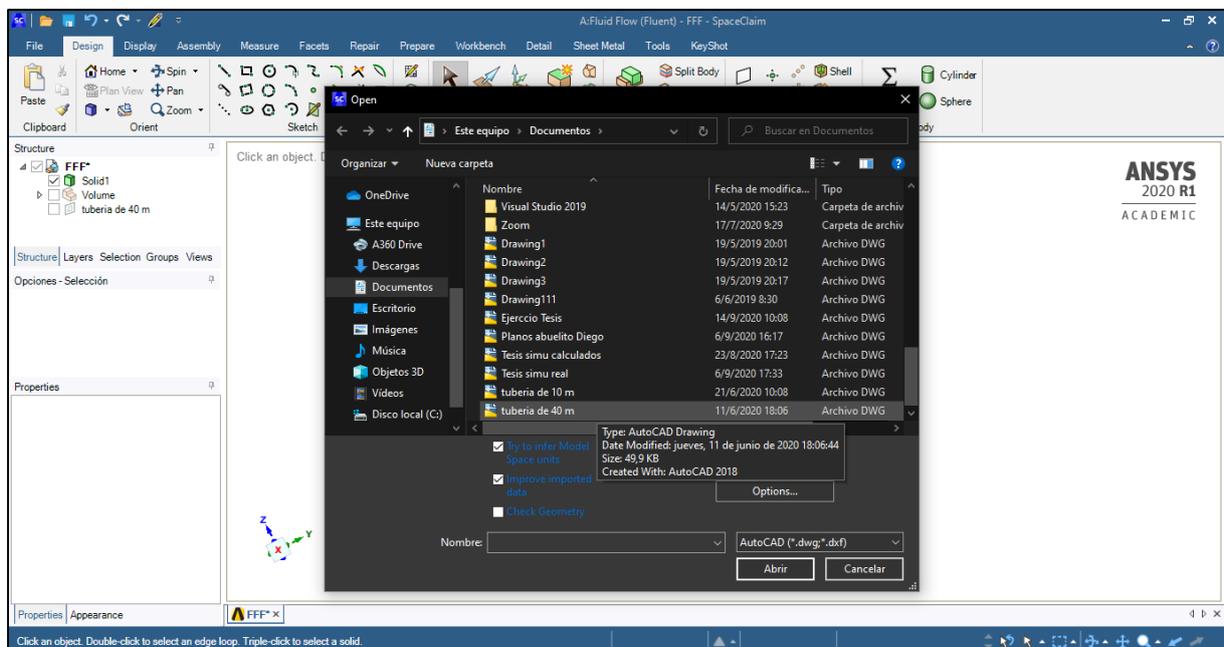


Figura 3.21 Importación del modelo 3D
Fuente: Propia

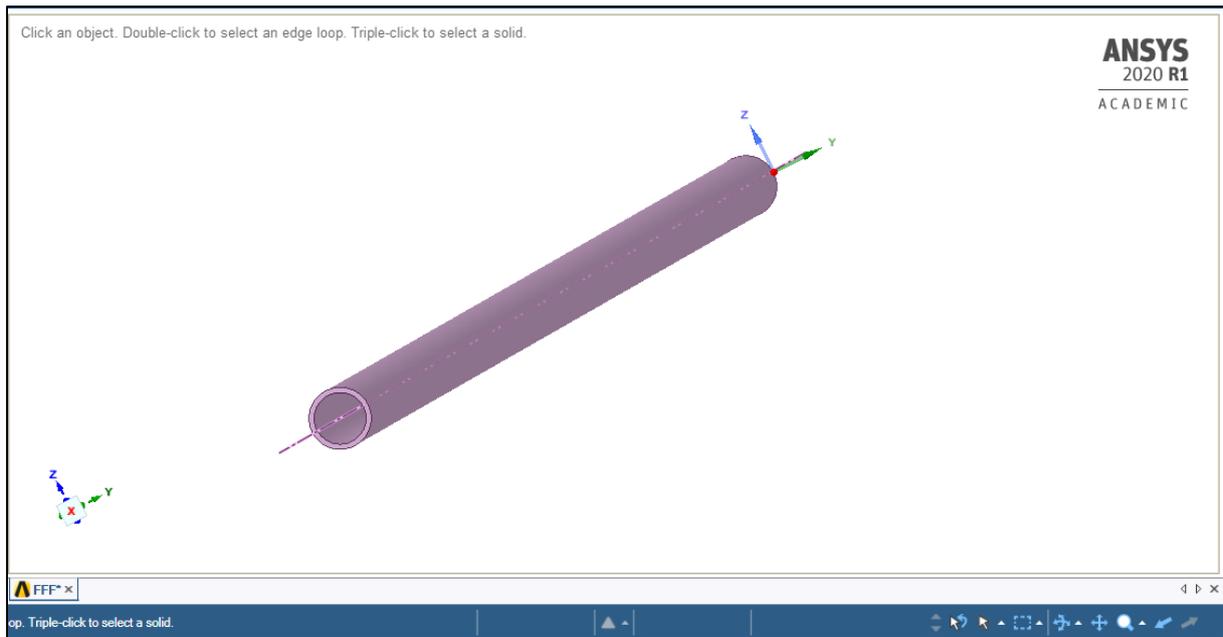


Figura 3.22 Tubo en la herramienta Geometry
Fuente Propia

- **Extracción del volumen (Geometry)**

Para extraer el volumen se debe ir a la pestaña **Prep** donde en **Volumen Extract** se selecciona cada una de las caras del tubo y el interior del mismo, para que el programa extraiga el volumen. Como se muestra en la Figura 3.23 y Figura 3.24.

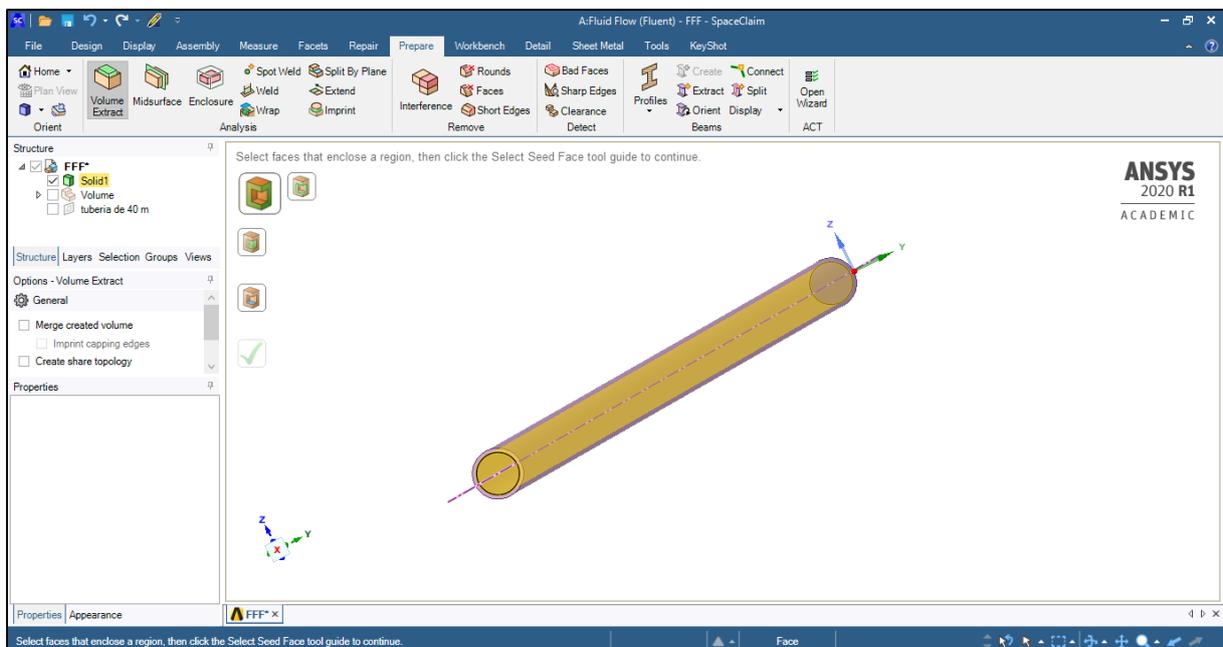


Figura 3.23 Extracción de volumen en Geometry
Fuente: Propia

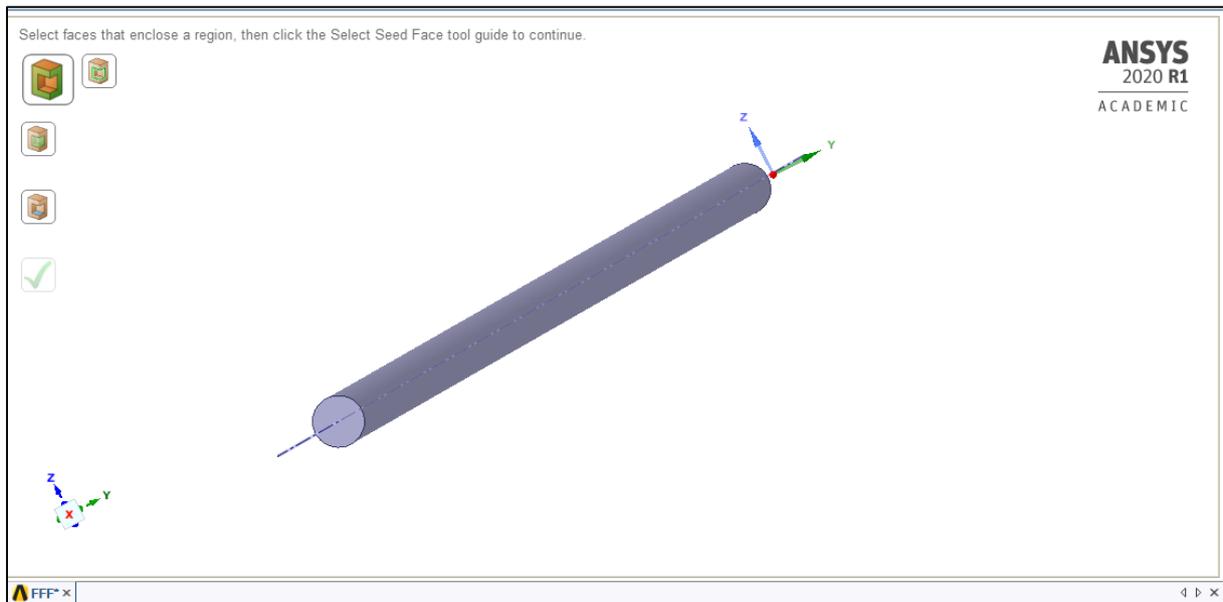


Figura 3.24 Volumen extraído
Fuente: Propia

- **Mallado (Mesh)**

Terminada la extracción de volumen, se procede a dar nombres a las caras seleccionándolas, dando clic derecho en la cara y hacer clic en **Create Named Selection**, de esta manera se da un nombre a la cara. Como se muestra en la Figura 3.25.

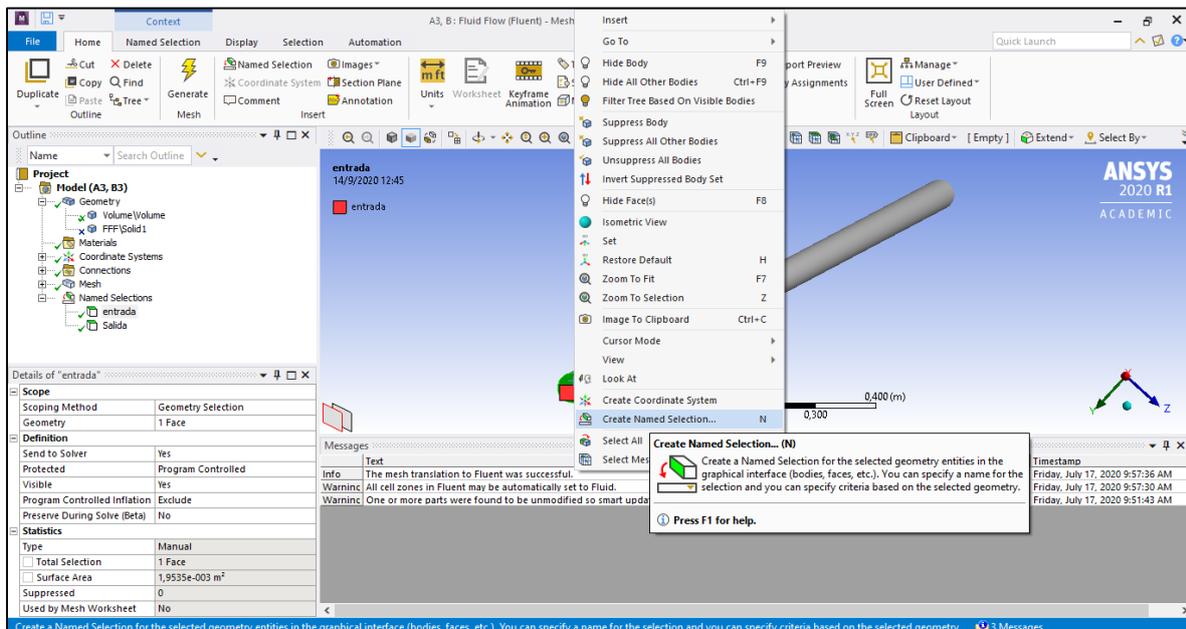


Figura 3.25 Nombramiento de cara en Mesh
Fuente: Propia

Obteniendo los nombres de las caras se procede a realizar la malla haciendo clic derecho en **Mesh** donde se inserta **Sizing**, se seleccionará el volumen y las dimensiones mediante **Element Size**. Como se muestra en la Figura 3.26.

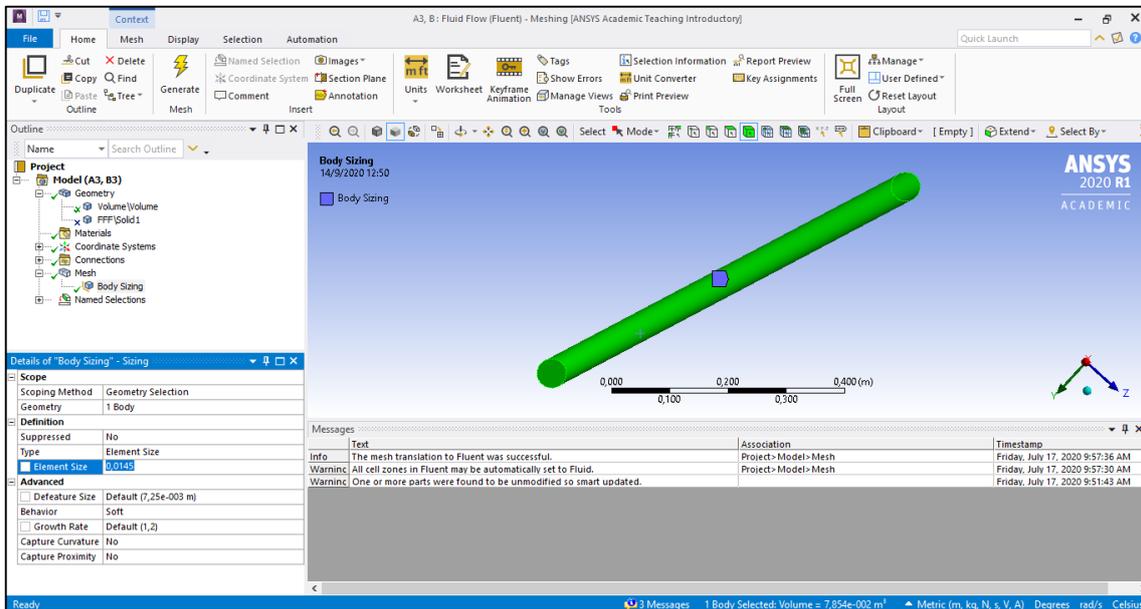


Figura 3.26 Selección de volumen para creación de malla
Fuente: Propia

Configurado los parámetros, clic derecho en **Mesh** dando clic en **Generate Mesh** se esperará un tiempo hasta que se genere la malla y se hace clic en **Update**. Como se muestra en la Figura 3.27.

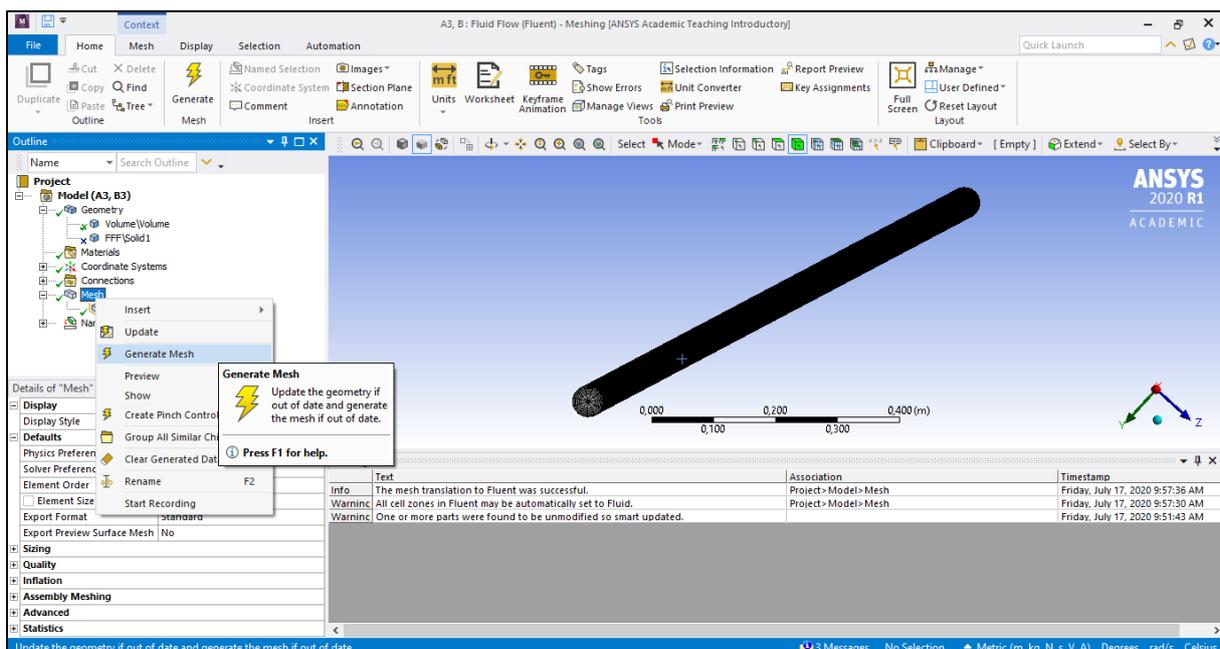


Figura 3.27 Creación de mallado
Fuente: Propia

- **Parámetros para la simulación (Setup)**

Se hace clic en **Units** donde se abrirá una pestaña para configurar las unidades que se utilizarán como: presión, temperatura, entre otros. Como se muestra en la Figura 3.28 y Figura 3.29.

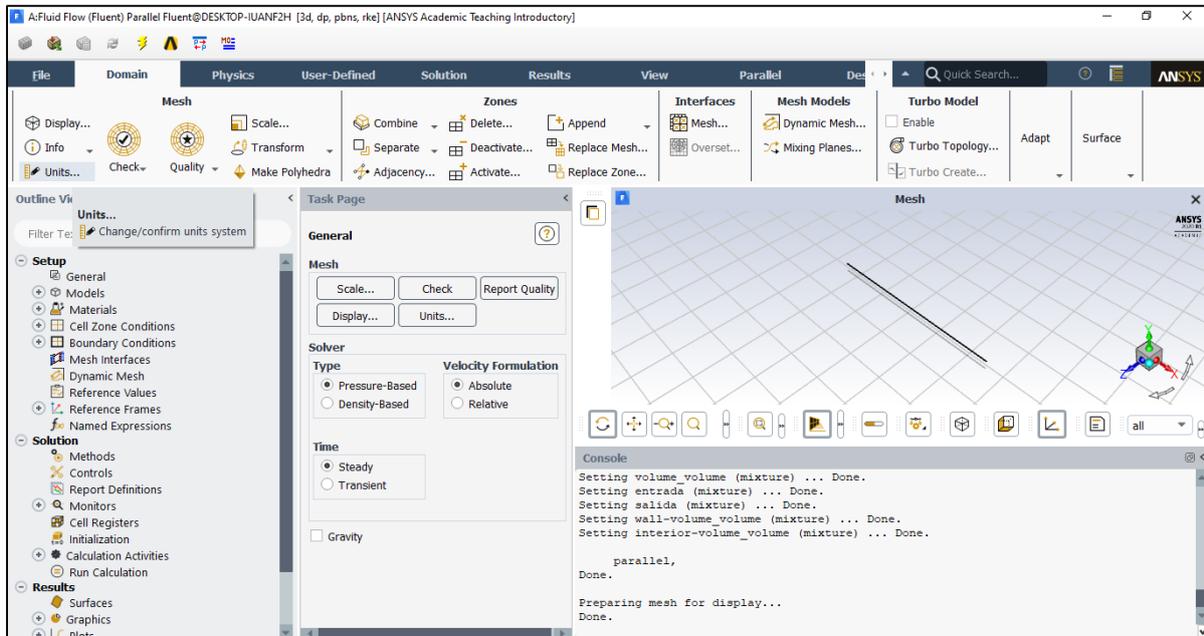


Figura 3.28 Herramienta Setup
Fuente: Propia

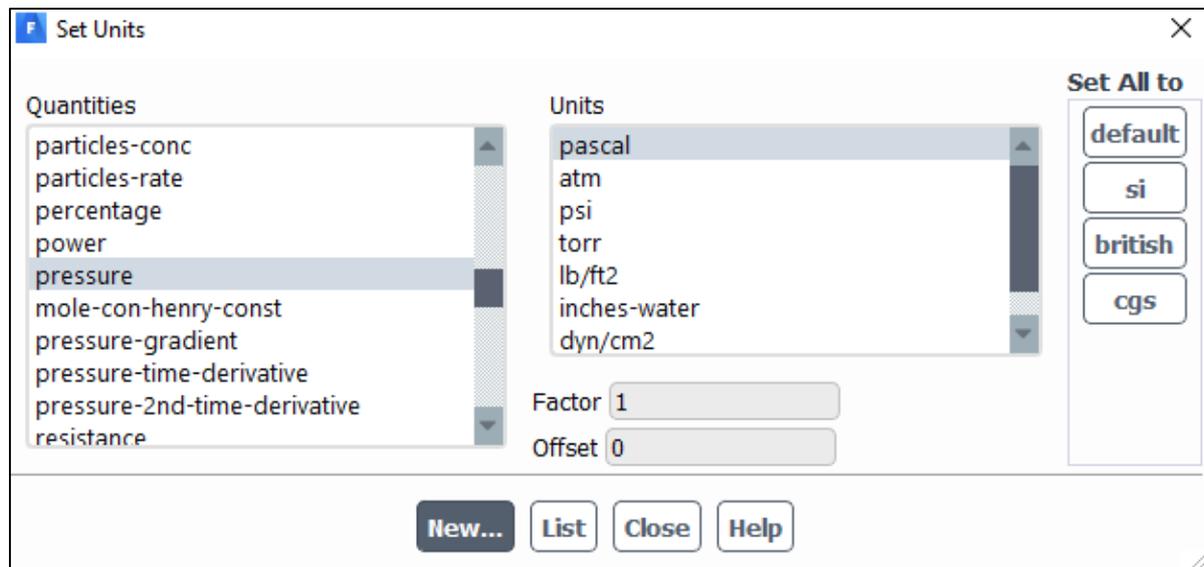


Figura 3.29 Verificación de unidades
Fuente: Propia

En la pestaña **Physics**, se marca la casilla **Energy** y se hace clic **Viscous** donde se seleccionan los parámetros de la Figura 3.30.

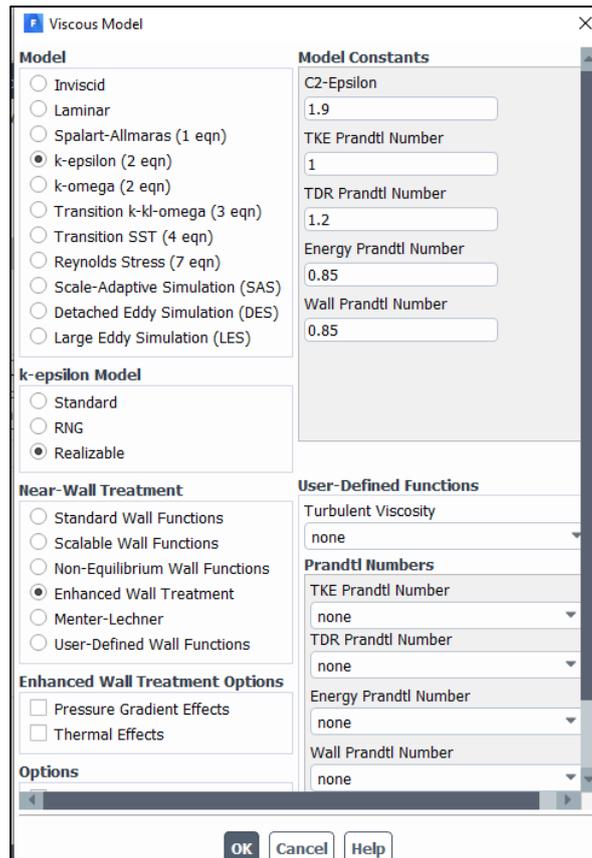


Figura 3.30 Configuración de viscosidad
Fuente: Propia

A continuación, se hace clic en **Materials** donde se abre una pestaña para seleccionar el material de la tubería y el fluido que circulará. Como se muestra en las Figura 3.31 y Figura 3.32.

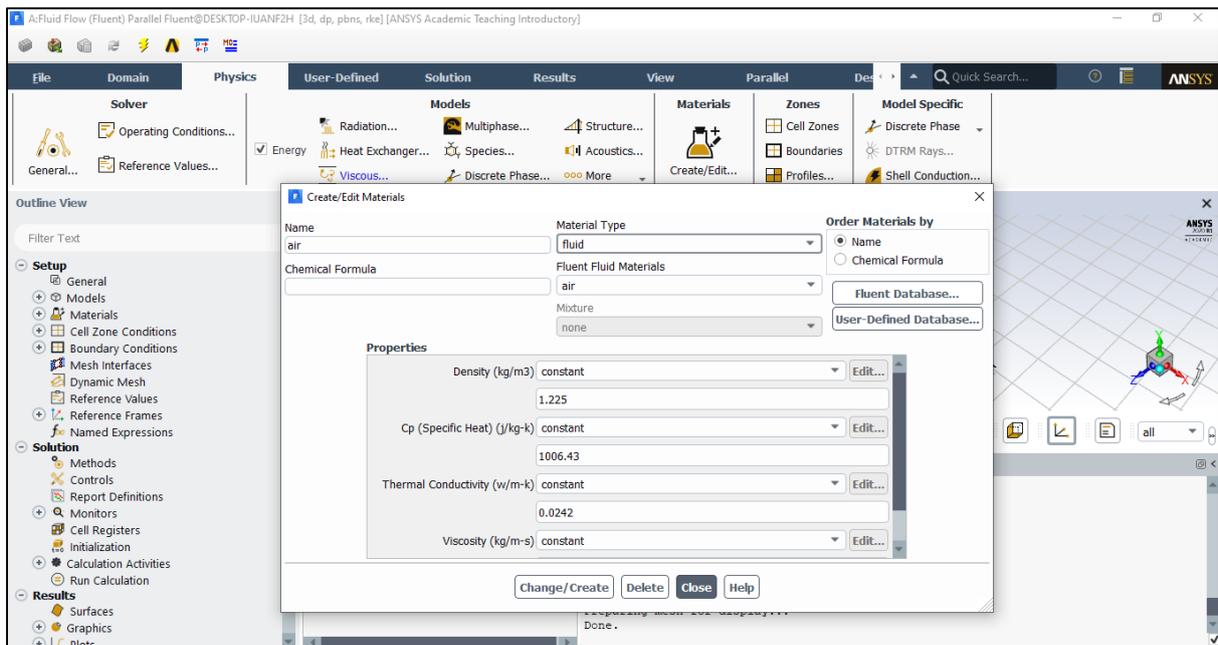


Figura 3.31 Configuración de parámetros del fluido
Fuente: Propia

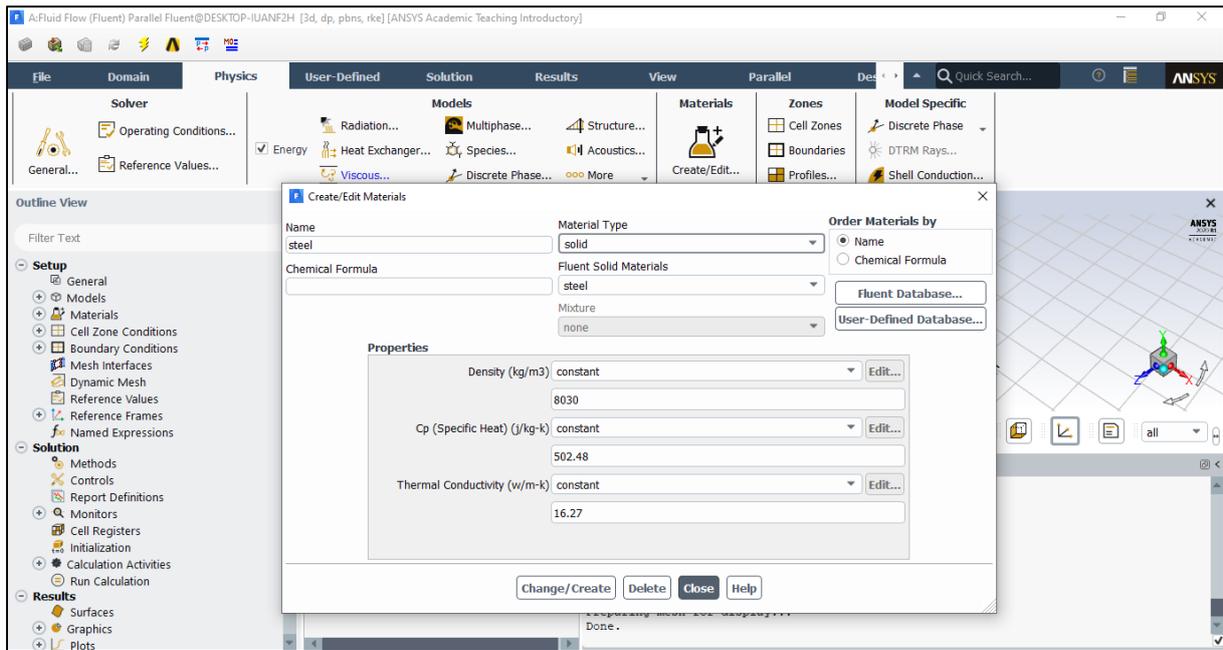


Figura 3.32 Configuración de parámetros del material
Fuente: Propia

A continuación, hacer clic en **Boundaries** donde se configura los parámetros de entrada como se muestra en la Figura 3.33 y Figura 3.34.

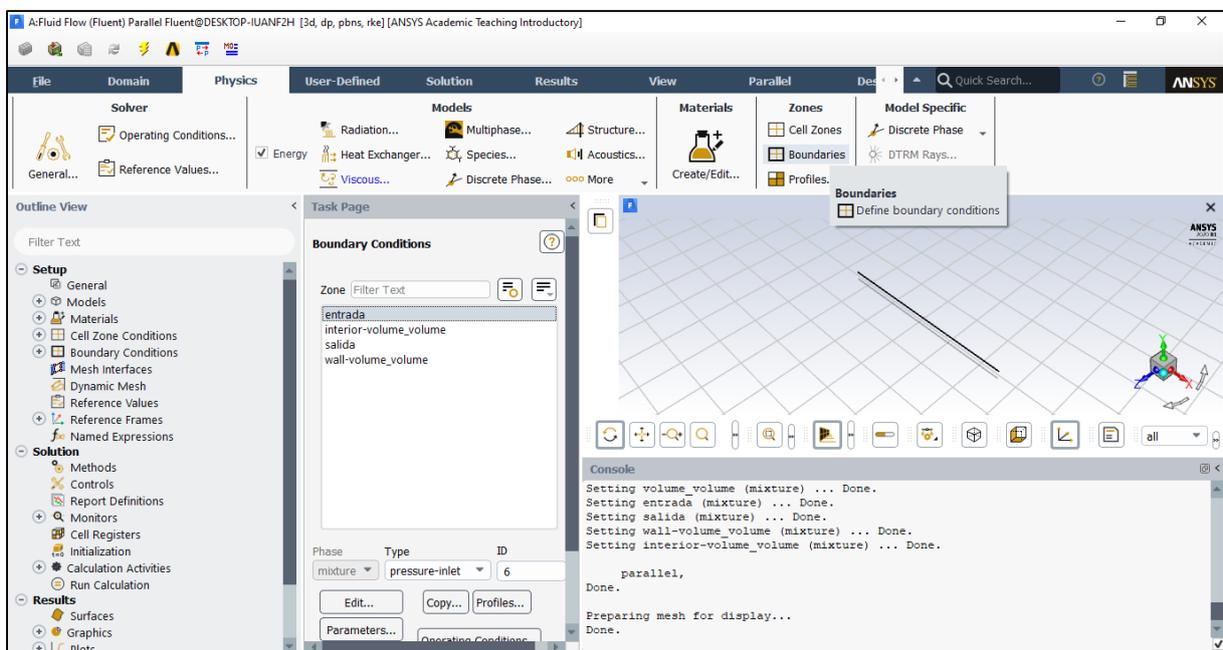


Figura 3.33 Ventana para la configuración de parámetros en la tubería
Fuente: Propia

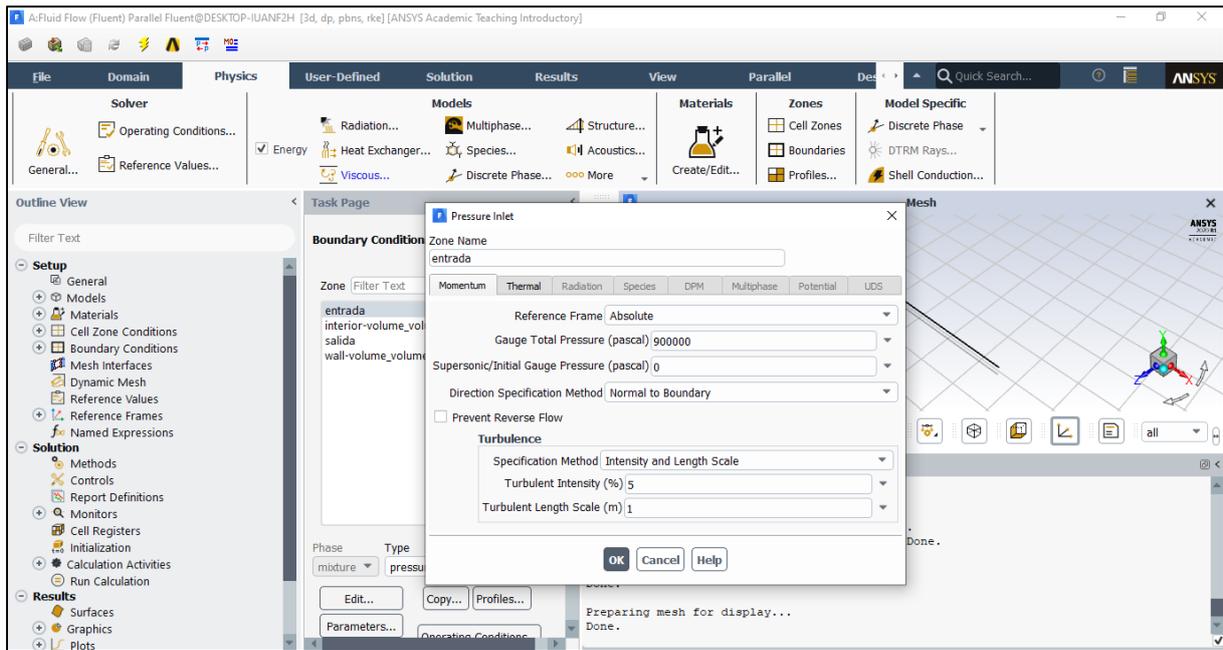


Figura 3.34 Configuración de parámetros de entrada
Fuente: Propia

En la barra de herramientas a la izquierda, se hace clic en **Methods** en donde se configura los métodos de solución, como se muestra la Figura 3.35.

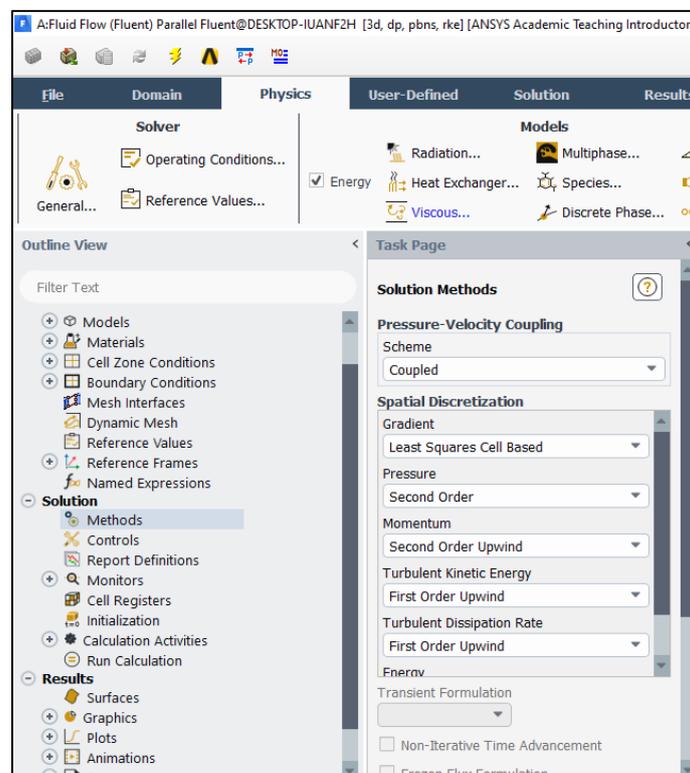


Figura 3.35 Configuración del método de solución
Fuente Propia

A continuación, en la misma ventana se hace clic en **Initialization** donde se configura en la entrada los parámetros de presión y velocidad, como se muestra en la Figura 3.36.

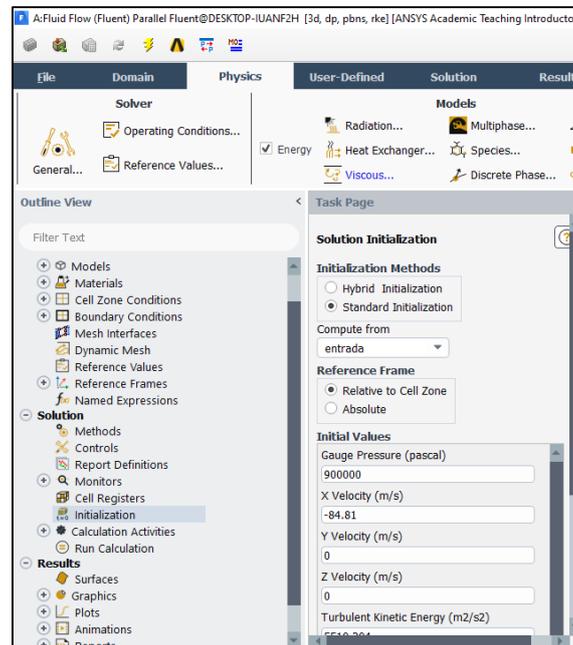


Figura 3.36 Configuración de inicialización
Fuente: Propia

Se dirige a la pestaña **Solution**, se hace clic en **Run Calculation** donde se abrirá una pestaña donde se configura el número de iteraciones que se va a realizar, así como se muestra en la Figura 3.37, Figura 3.38 y Figura 3.39.

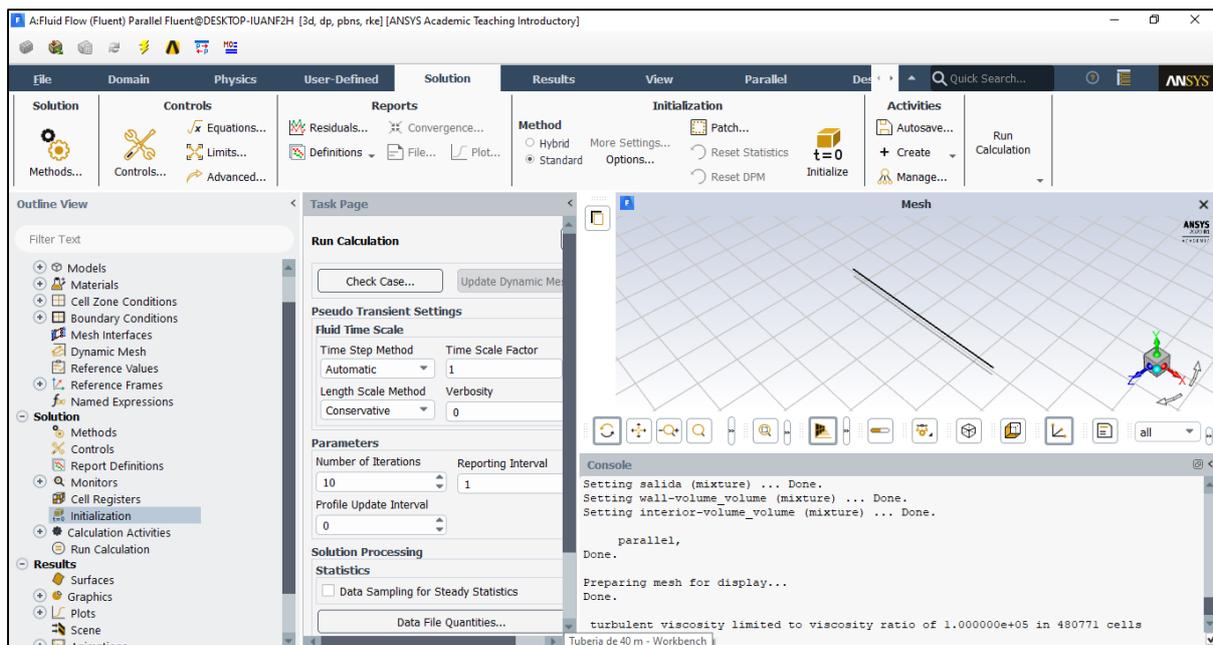


Figura 3.37 Configuración de iteraciones
Fuente: Propia

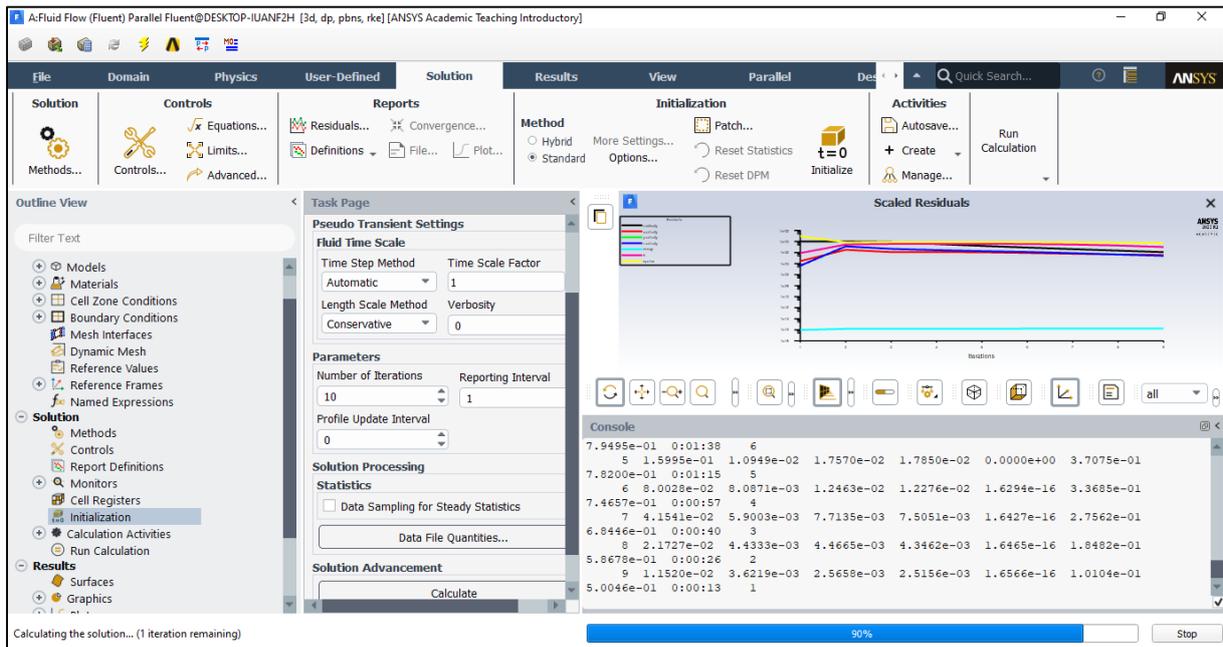


Figura 3.38 Cálculos de iteraciones
Fuente Propia

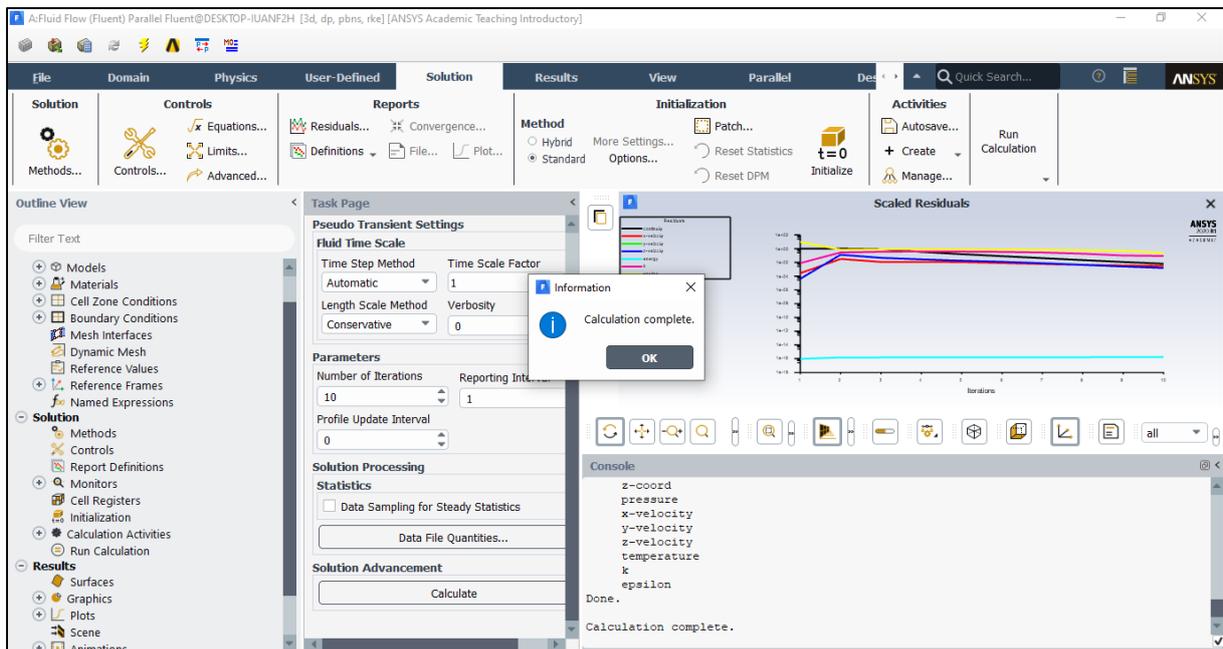


Figura 3.39 Resultados de iteración realizada
Fuente: Propia

- **Visualización de la simulación obtenida (Results)**

Una vez realizada la iteración se mostrarán sus resultados. Para poder observarlos, se debe trazar un plano de corte en los ejes que se desea visualizar el resultado, en este caso se realizó un corte en el plano XY. Como se muestra en la Figura 3.40.

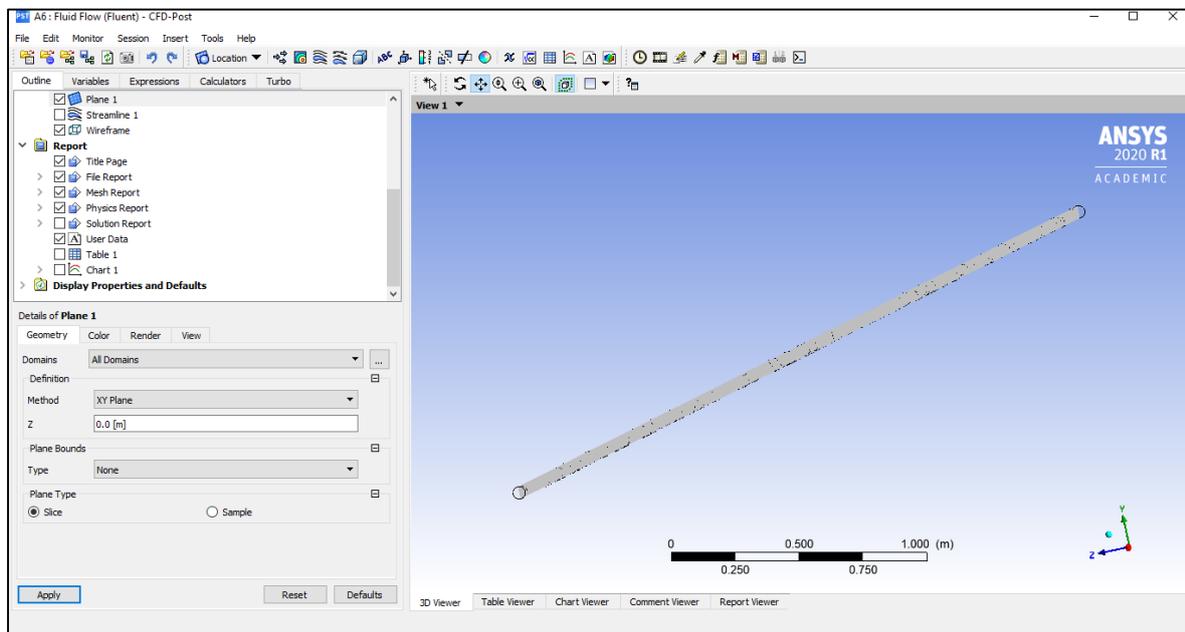


Figura 3.40 Corte de un plano en la tubería
Fuente: Propia

Obtenido el plano se inserta **Contour** donde se puede apreciar la caída de presión que existe en la tubería simulada. Como se muestra en la Figura 3.41.

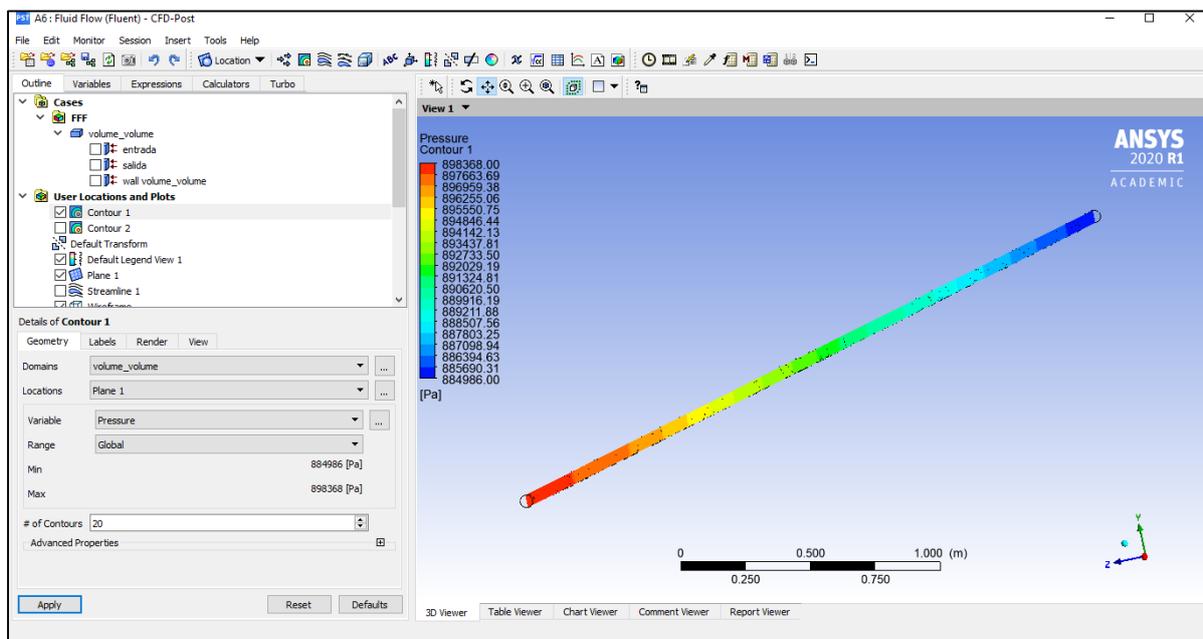


Figura 3.41 Contorno de presión en la tubería
Fuente: Propia

3.7 Validación de la simulación con el caso de flujo interno de un tubo calculado en la sección 3.2

En la siguiente Figura 3.42 y Anexo C, se presenta la simulación del caso del flujo interno desarrollado en la sección 3.2.

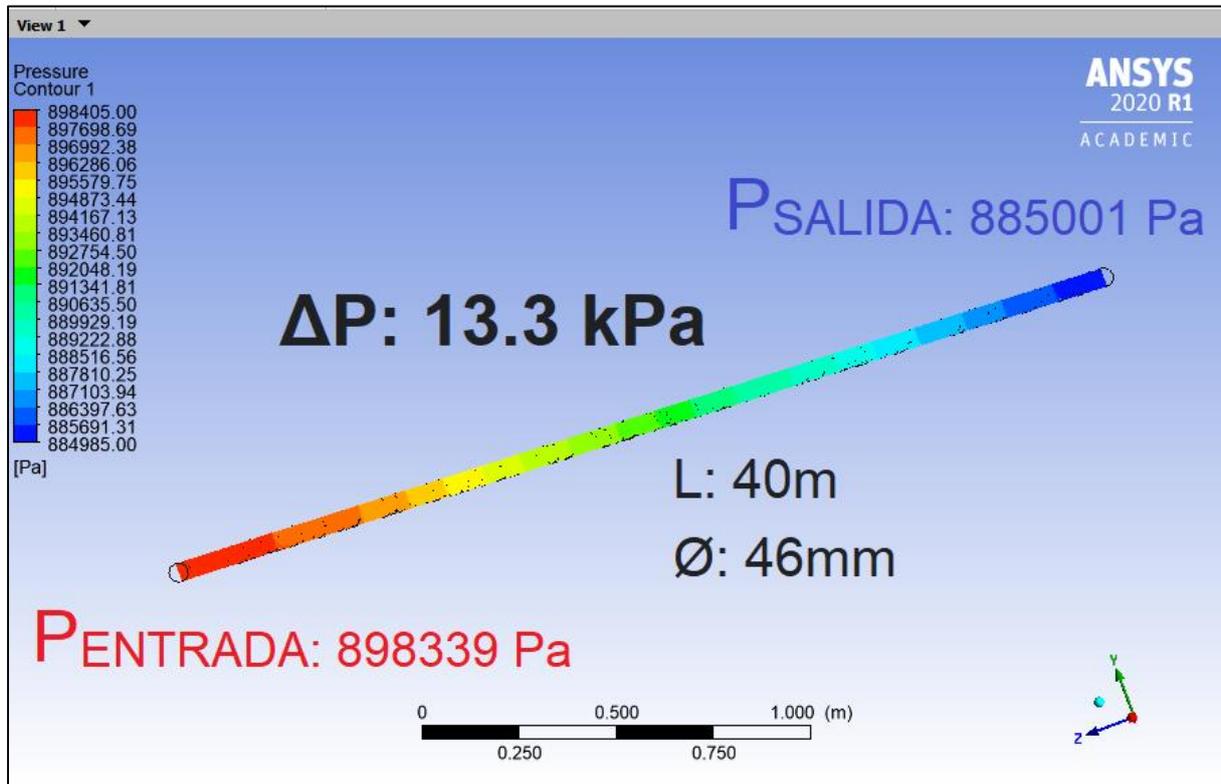


Figura 3.42 Simulación de caso de flujo interno
Fuente: Propia

Con los resultados obtenidos de la simulación se procede a comparar mediante los valores obtenidos en el método A y C, la caída de presión que se obtuvo como se muestra en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15 Comparación de caso de flujo interno de un tubo

Resultados	Caída de presión (kPa)	Comparación (%)
Simulación	13.3	0
Método A	13.39	0.67
Método C	13.15	1.12

Fuente: Propia

Con el resultado que se obtuvo en la simulación del caso de flujo interno se puede apreciar que la simulación tiene un valor aproximado a los cálculos dando como comparación en el método A de 0.67 (%) y método C de 1.12 (%), por lo tanto, se puede concluir que la simulación es válida mediante los datos obtenidos.

3.8 Simulación de las tuberías de la red del laboratorio

Siguiendo los pasos de la Figura 3.19, y los cálculos de la Tabla 3.1 se realiza la simulación de la red de distribución de aire comprimido del Laboratorio de Tecnología Industrial (LTI) con la ayuda del software ANSYS, como se muestra en la Figura 3.43 y Anexo D.

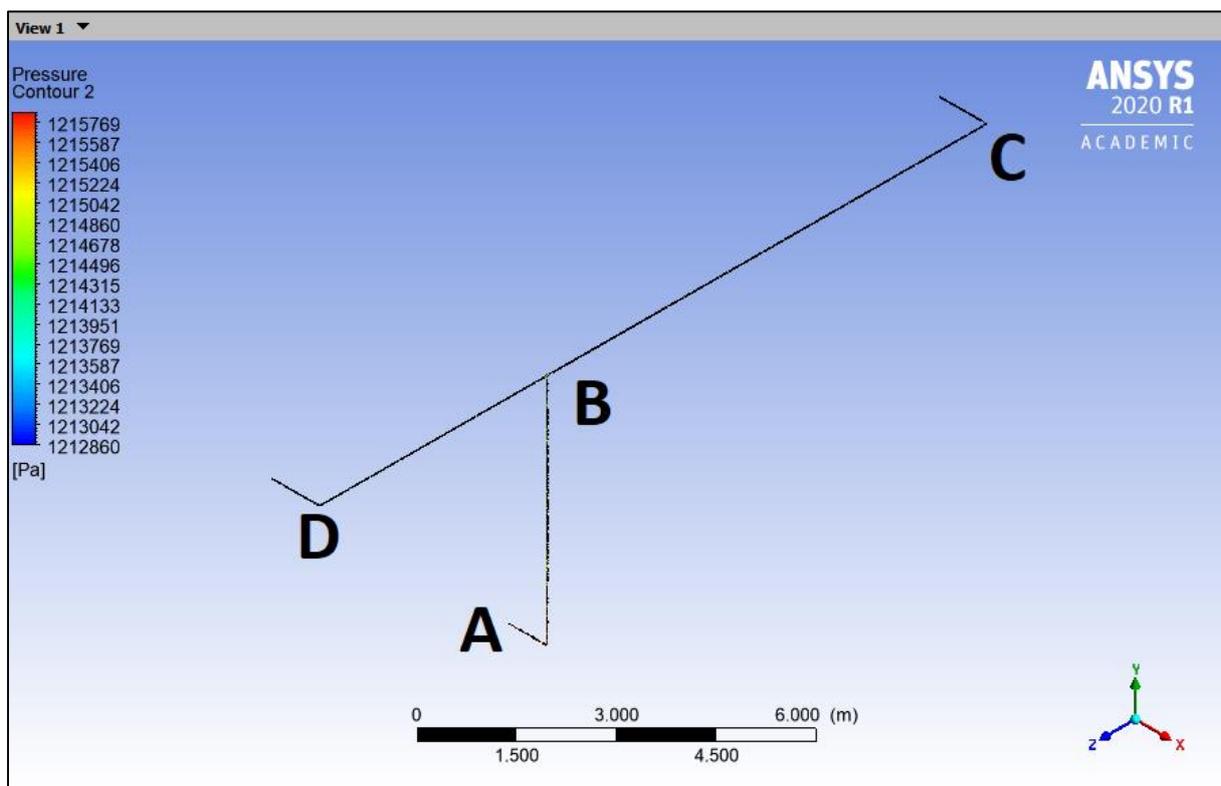


Figura 3.43 Simulación de la red de tubería
Fuente: Propia

- **Comparación entre simulación y dimensionamiento de la sección 3.4.**

A continuación, se presenta los resultados obtenidos mediante la simulación y los cálculos realizados como se muestran en las siguientes figuras: Figura 3.44, Figura 3.45 y Figura 3.46.

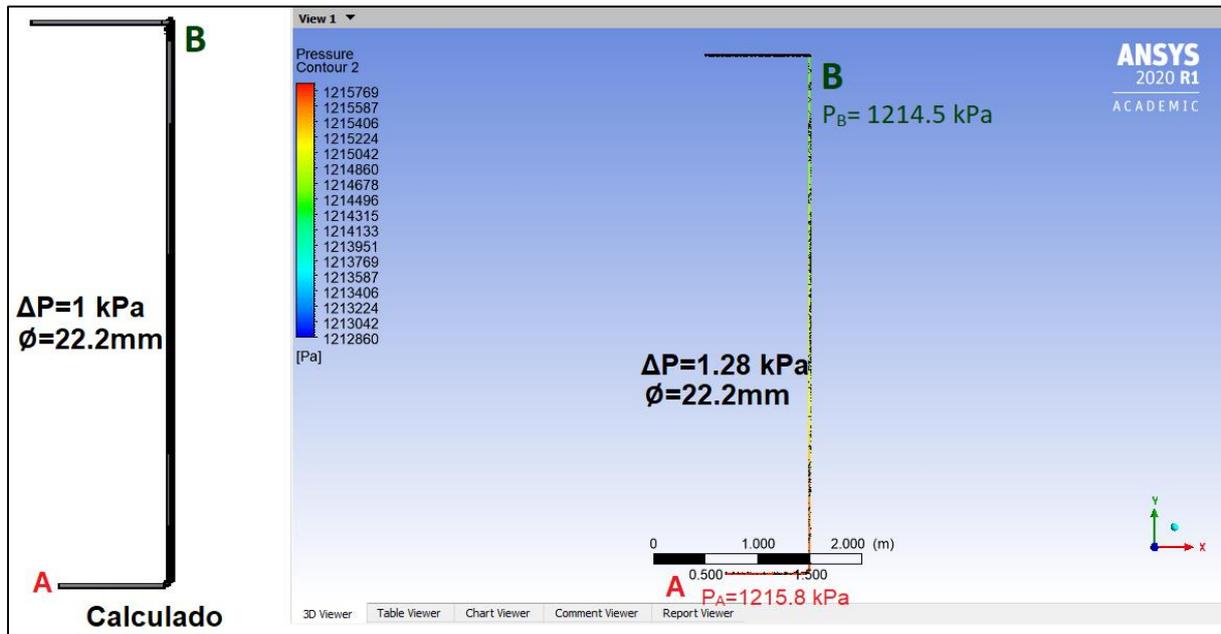


Figura 3.44 Comparación entre cálculos y simulación en el tramo A-B
Fuente: Propia

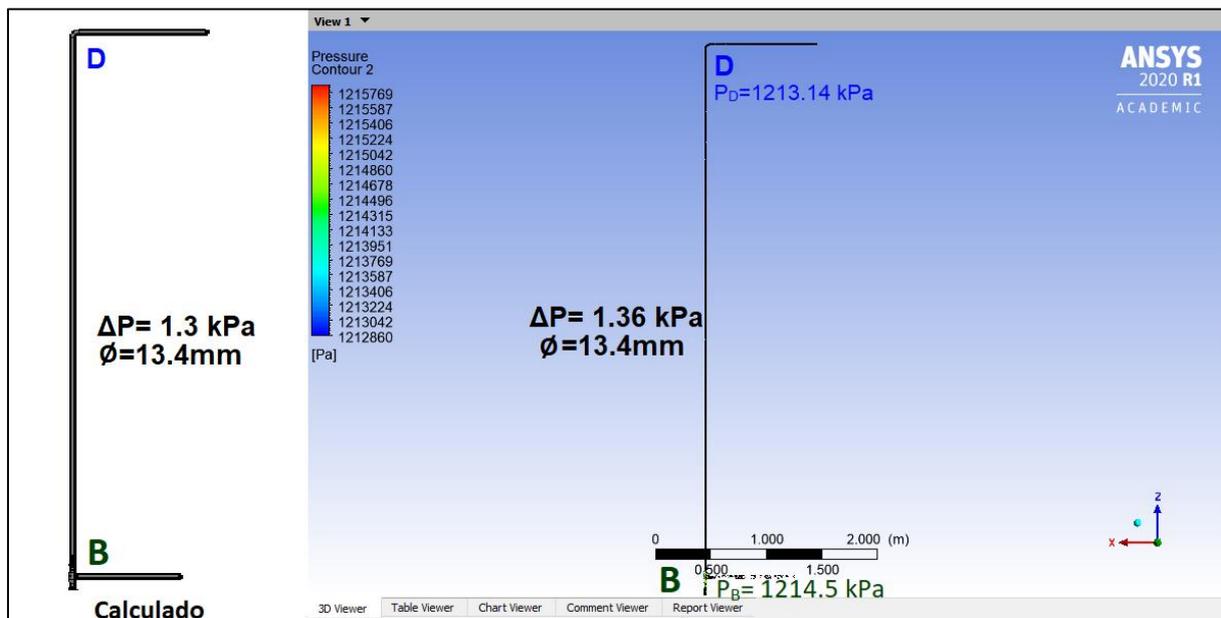


Figura 3.45 Comparación entre cálculos y simulación en el tramo B-D
Fuente: Propia

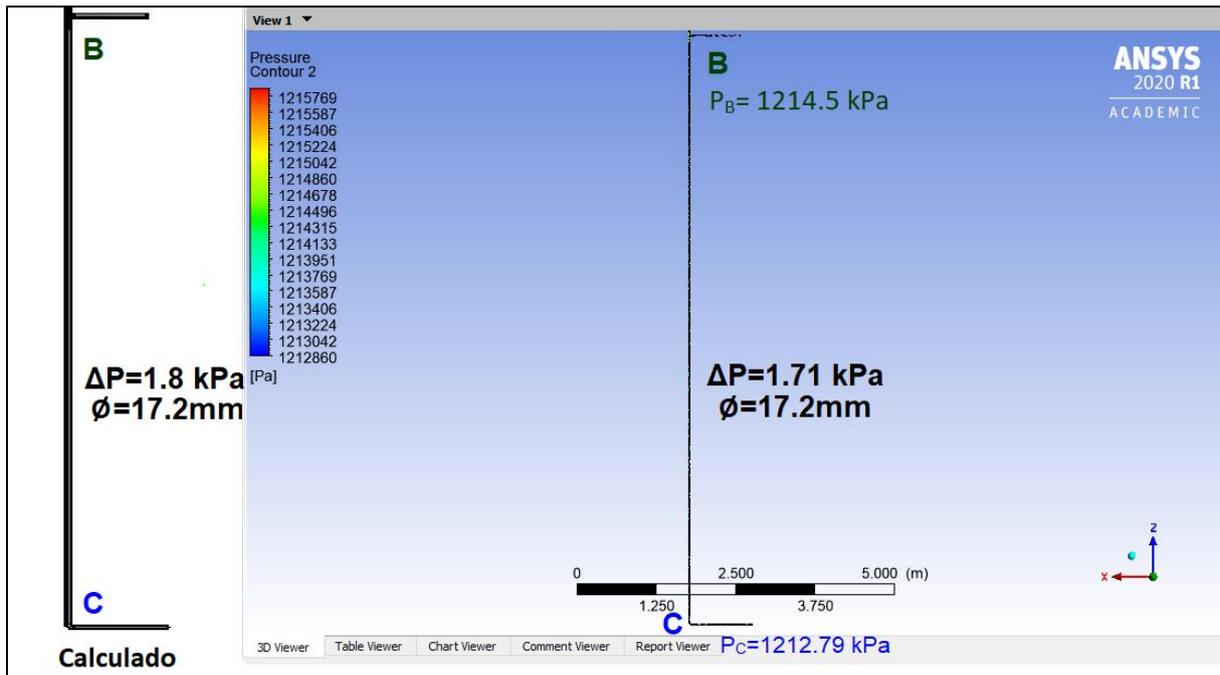


Figura 3.46 Comparación entre cálculos y simulación en el tramo B-C
Fuente: Propia

Para poder comparar de mejor manera, se realiza la toma de datos de la simulación en los puntos A, B, C y D siendo sus valores respectivamente: $P_A = 1215.8 \text{ (kPa)}$, $P_B = 1214.5 \text{ (kPa)}$, $P_C = 1212.7 \text{ (kPa)}$ y $P_D = 1213.4 \text{ (kPa)}$, como se muestra en las siguientes figuras: Figura 3.47, Figura 3.48, Figura 3.49 y Figura 3.50.

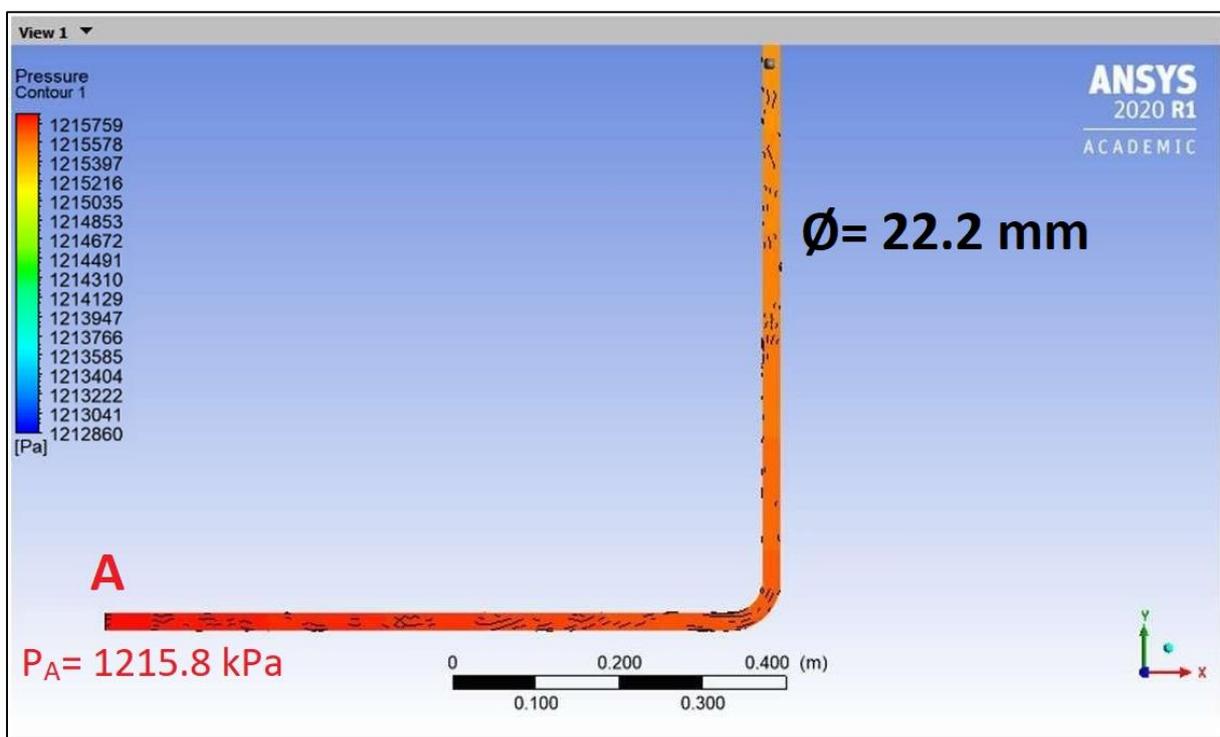


Figura 3.47 Toma de dato de presión en el punto A
Fuente Propia

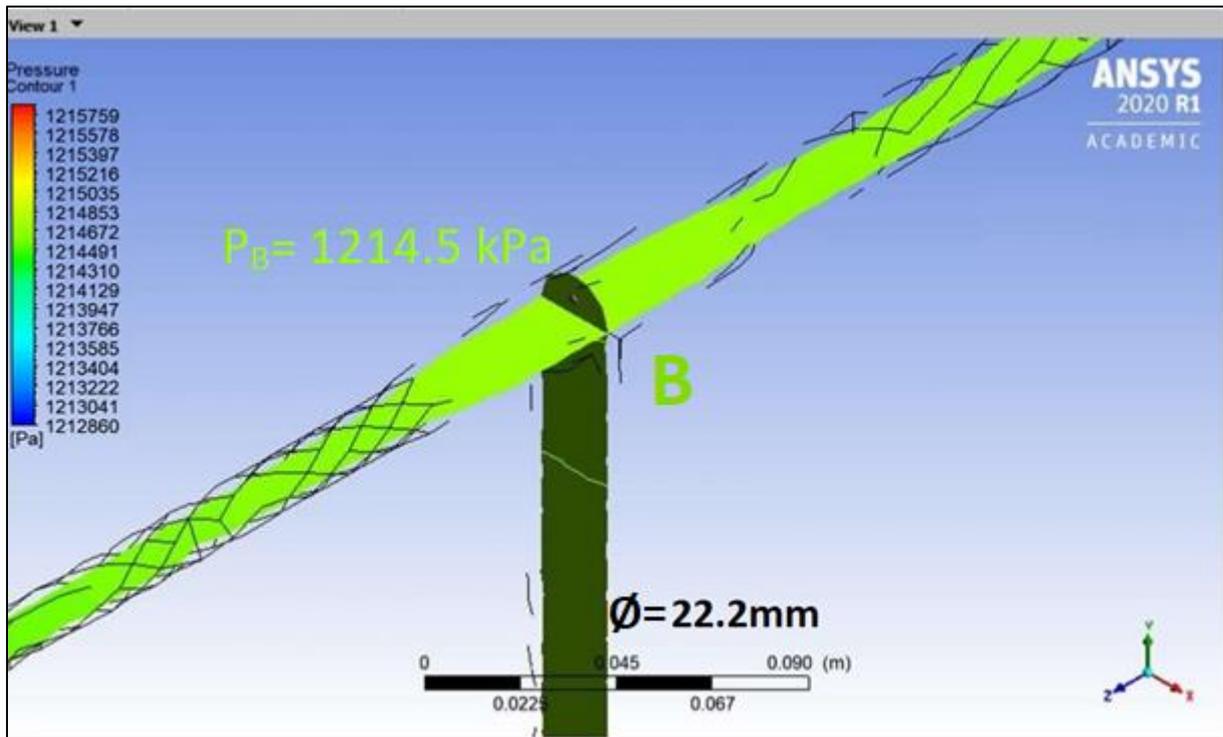


Figura 3.48 Toma de dato de presión en el punto B
Fuente: Propia

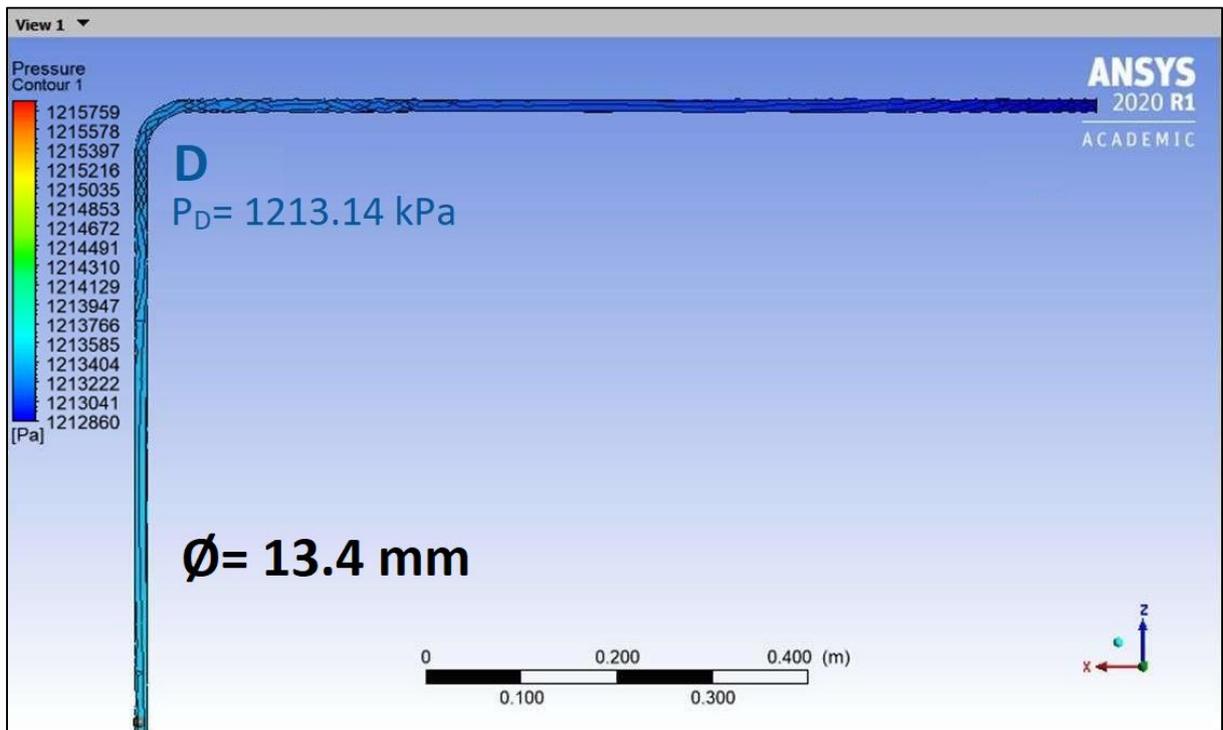


Figura 3.49 Toma de dato de presión en el punto D
Fuente: Propia

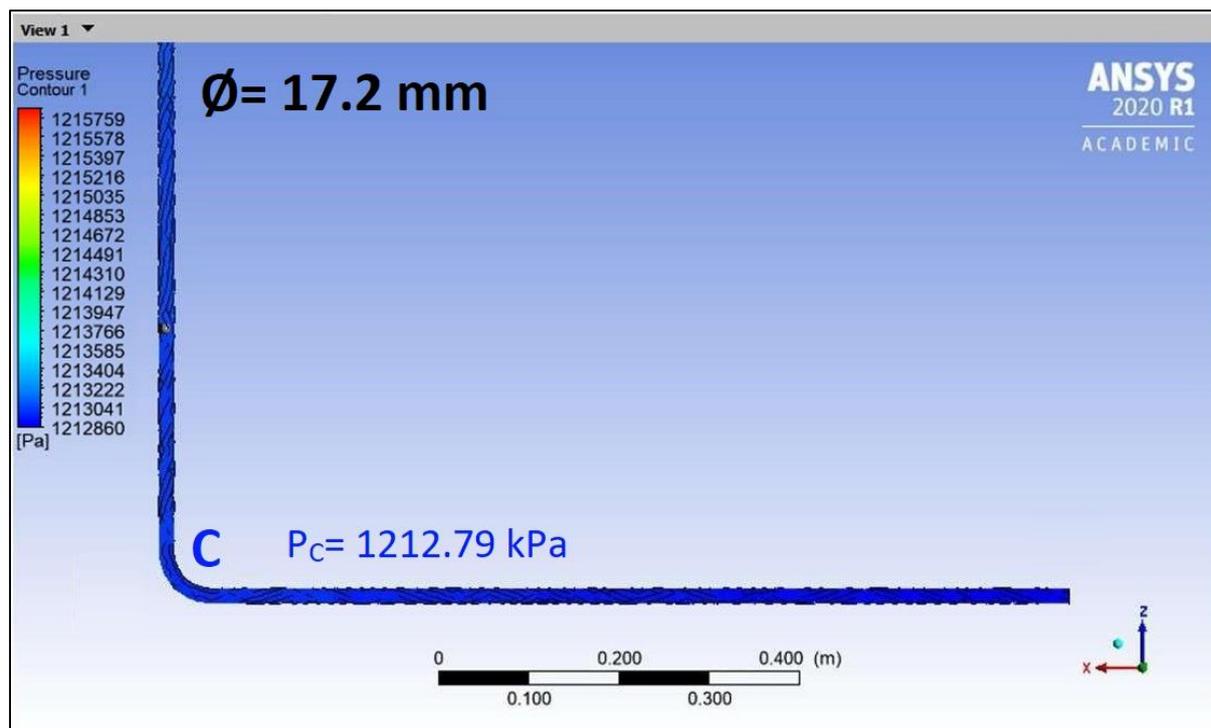


Figura 3.50 Toma de dato de presión en el punto C
Fuente: Propia

A continuación, en la Tabla 3.16 se presenta los resultados de la caída de presión entre la simulación y los cálculos de la red de distribución del Laboratorio de Tecnología Industrial (LTI).

Tabla 3.16 Comparación entre simulación y cálculos (ΔP)

Tramos	ΔP Simulación (acero) (kPa)	ΔP Cálculos (kPa)	Comparación (%)
A-B	1.28	1	28
B-D	1.71	1.8	5
B-C	1.36	1.3	4.61

Fuente: Propia

Obtenido los resultados de la simulación, se puede verificar con los cálculos que la comparación en cada tramo tiene una diferencia entre el 4 (%) al 28 (%), por lo tanto, la simulación tiene un valor cercano a la caída de presión que existirá en una red real.

3.9 Análisis de sensibilidad de la red con diferentes diámetros

- Simulación de red con diámetros de catálogos

Mediante los valores seleccionados que se encuentran en la Tabla 3.1 de la columna 3, se realiza el dibujo 3D y la simulación en ANSYS.

A continuación, se muestra la simulación de la red con los diámetros de catálogo en las siguientes figuras: Figura 3.51, Figura 3.52, Figura 3.53, Figura 3.54 y en el Anexo D.

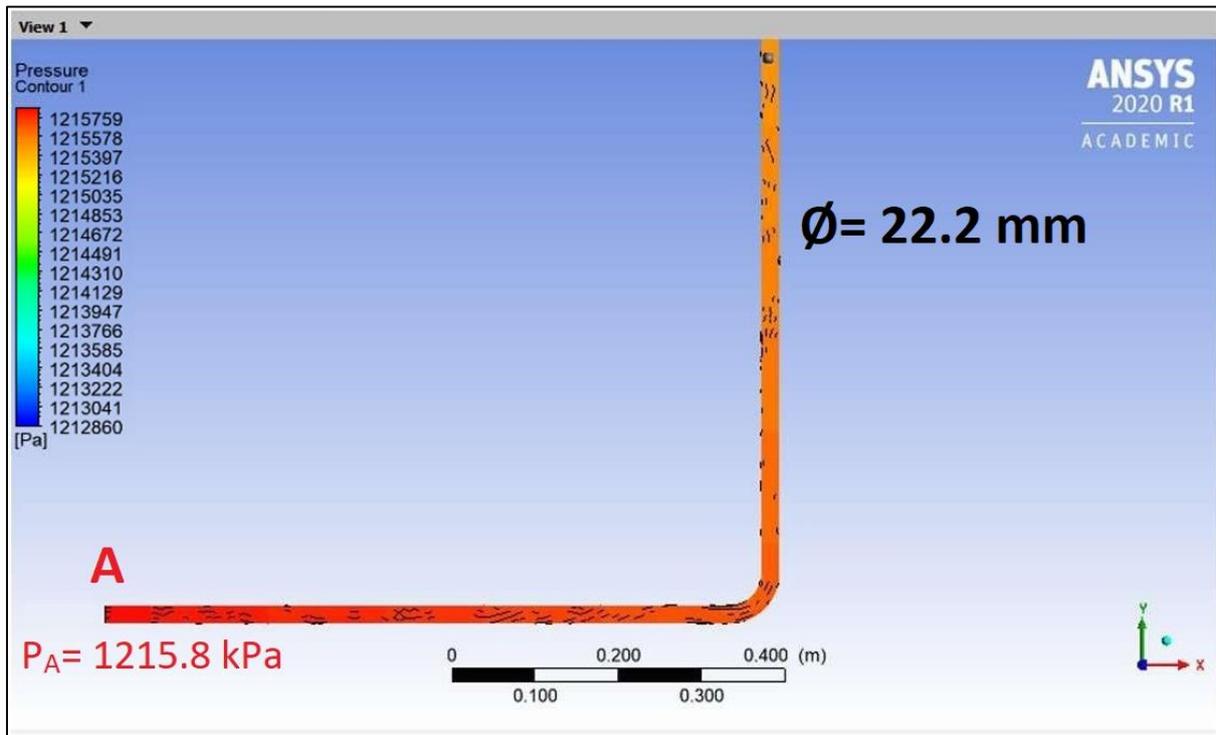


Figura 3.51 Extracto de tramo A-B (22.2 mm)
Fuente: Propia

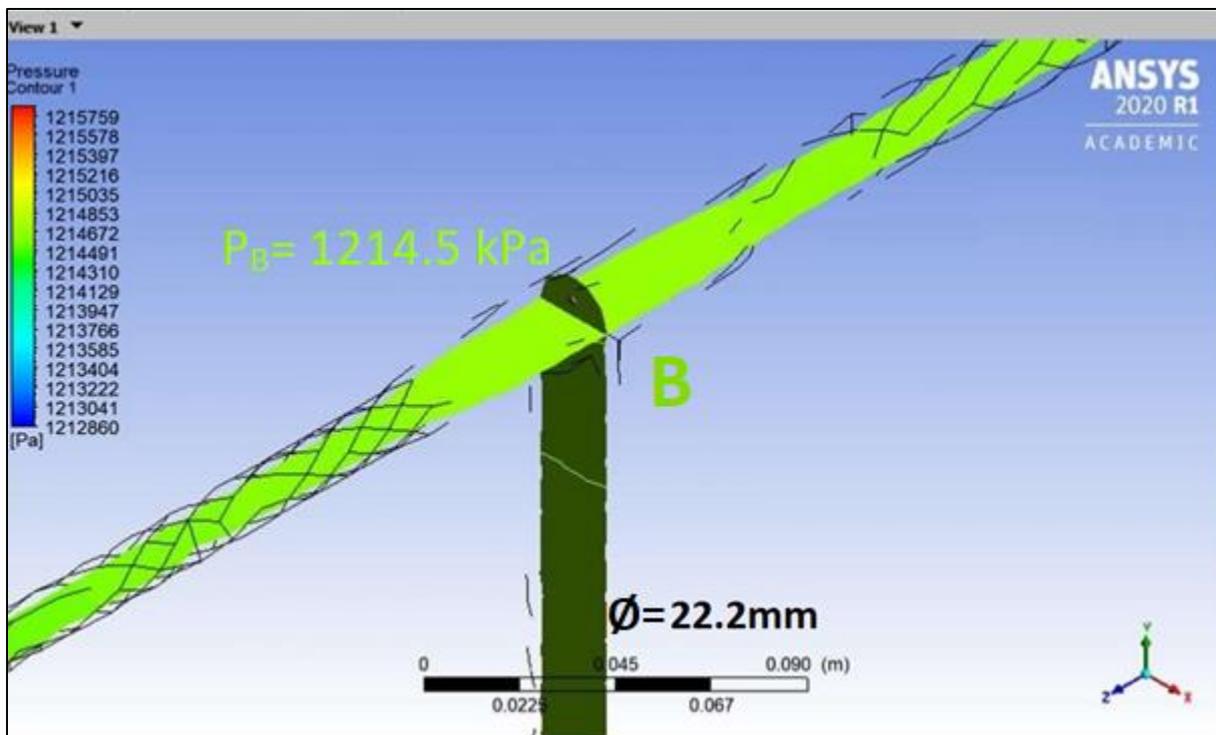


Figura 3.52 Extracto de la división Tee en la red (22.2 mm)
Fuente: Propia

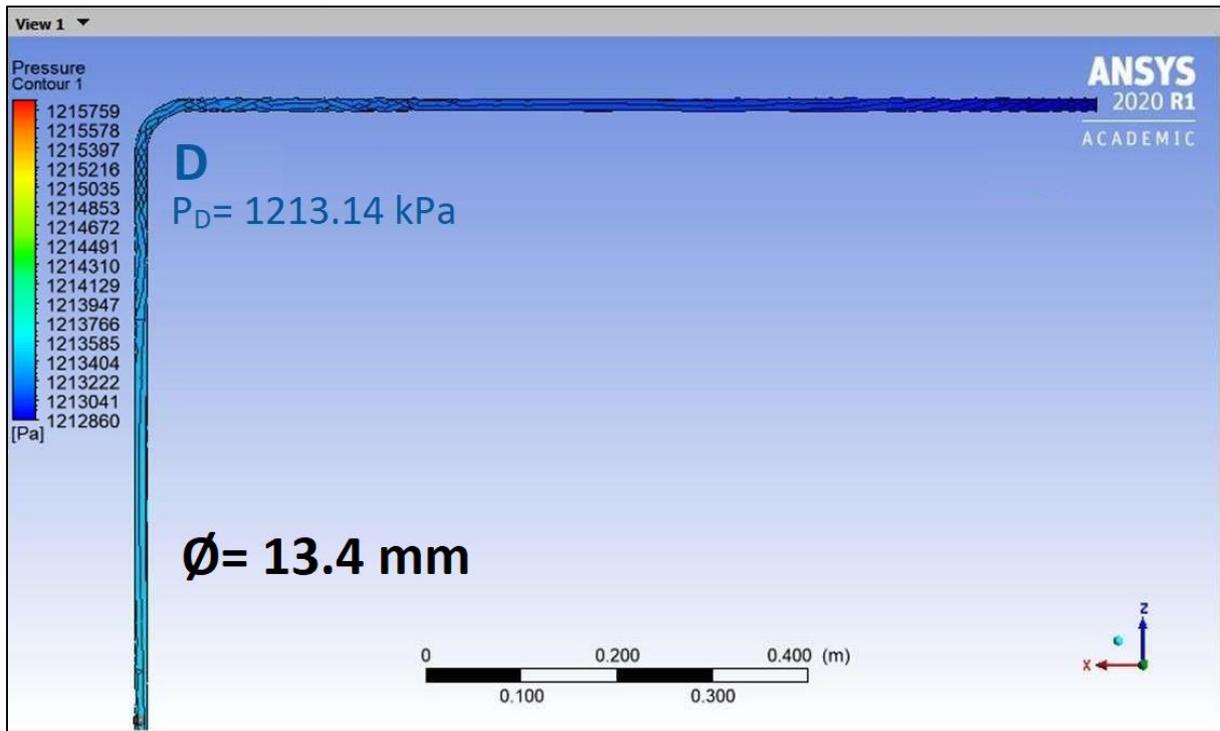


Figura 3.53 Extracto del tramo B-D (13.4 mm)
Fuente: Propia

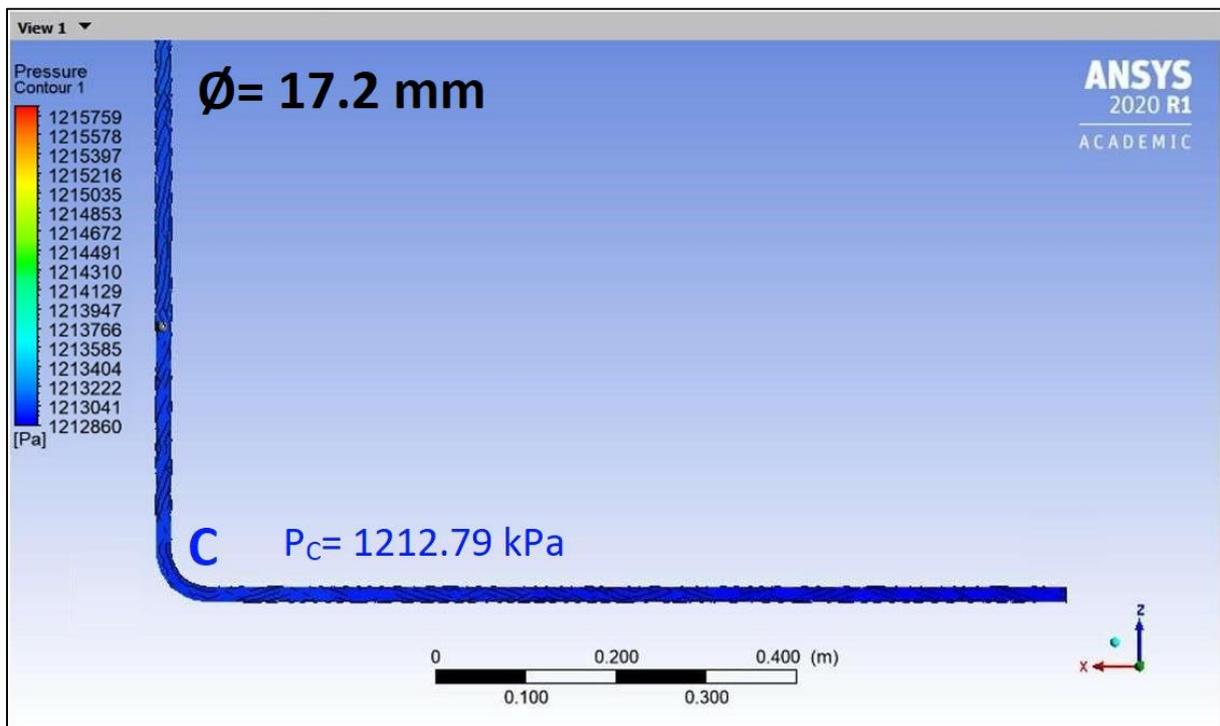


Figura 3.54 Extracto de tramo B-C (17.2 mm)
Fuente: Propia

- **Simulación de red con diámetros calculados**

Mediante los cálculos que se encuentran en la Tabla 3.13 en la columna 2 se realiza el dibujo 3D y la simulación en ANSYS con los valores exactos de los diámetros.

A continuación, se muestra la simulación de red con los diámetros calculados en las siguientes figuras: Figura 3.55, Figura 3.56, Figura 3.57, Figura 3.58 y en el Anexo D.

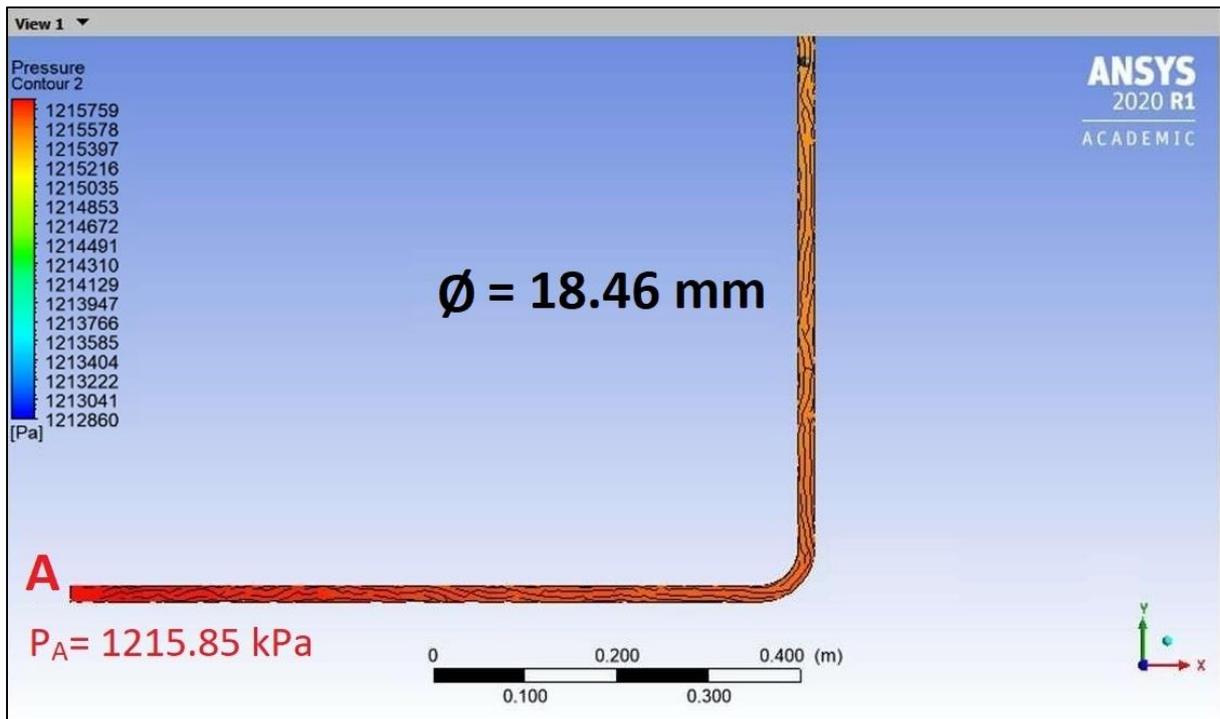


Figura 3.55 Extracto de tramo A-B (18.4 mm)
Fuente: Propia

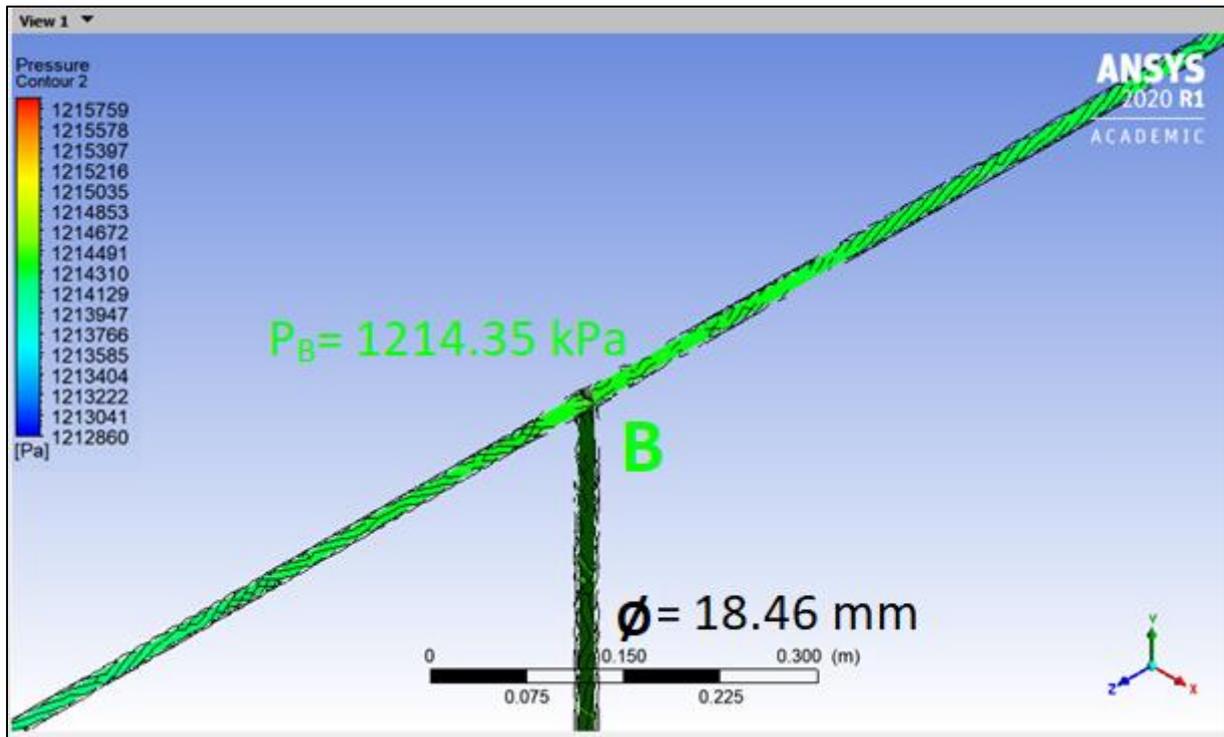


Figura 3.56 Extracto de la división Tee en la red (18.4 mm)
Fuente: Propia

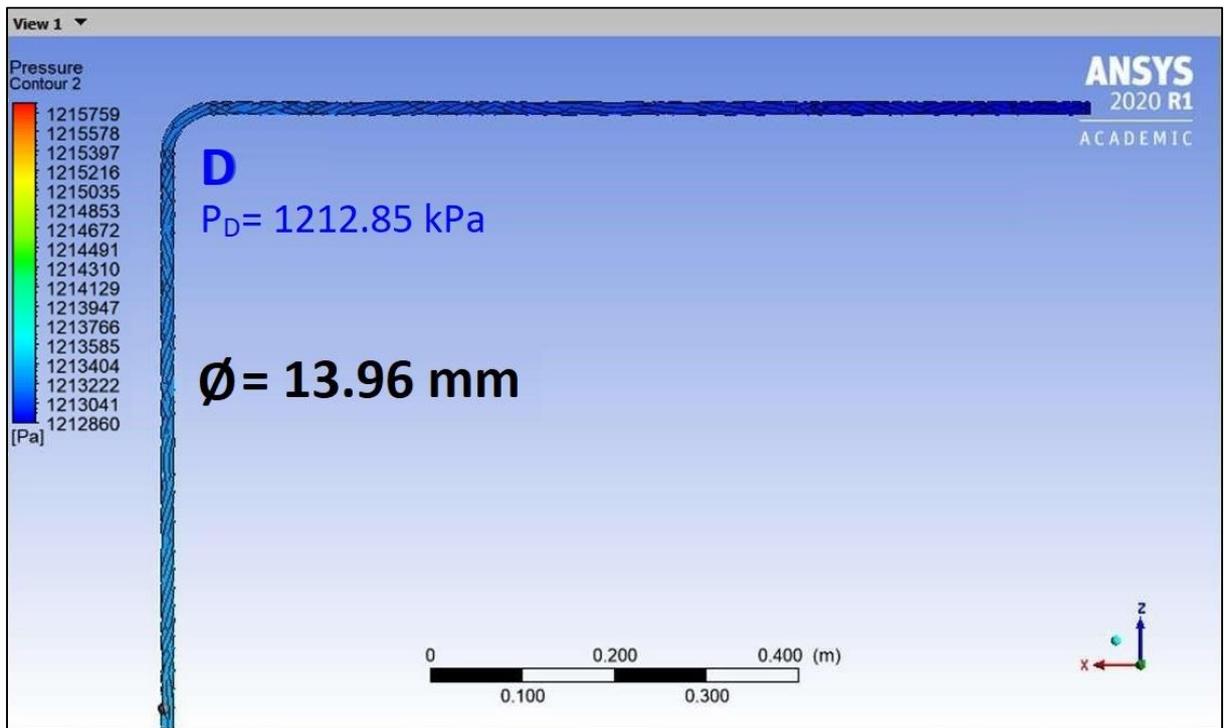


Figura 3.57 Extracto del tramo B-D (13.9 mm)
Fuente: Propia

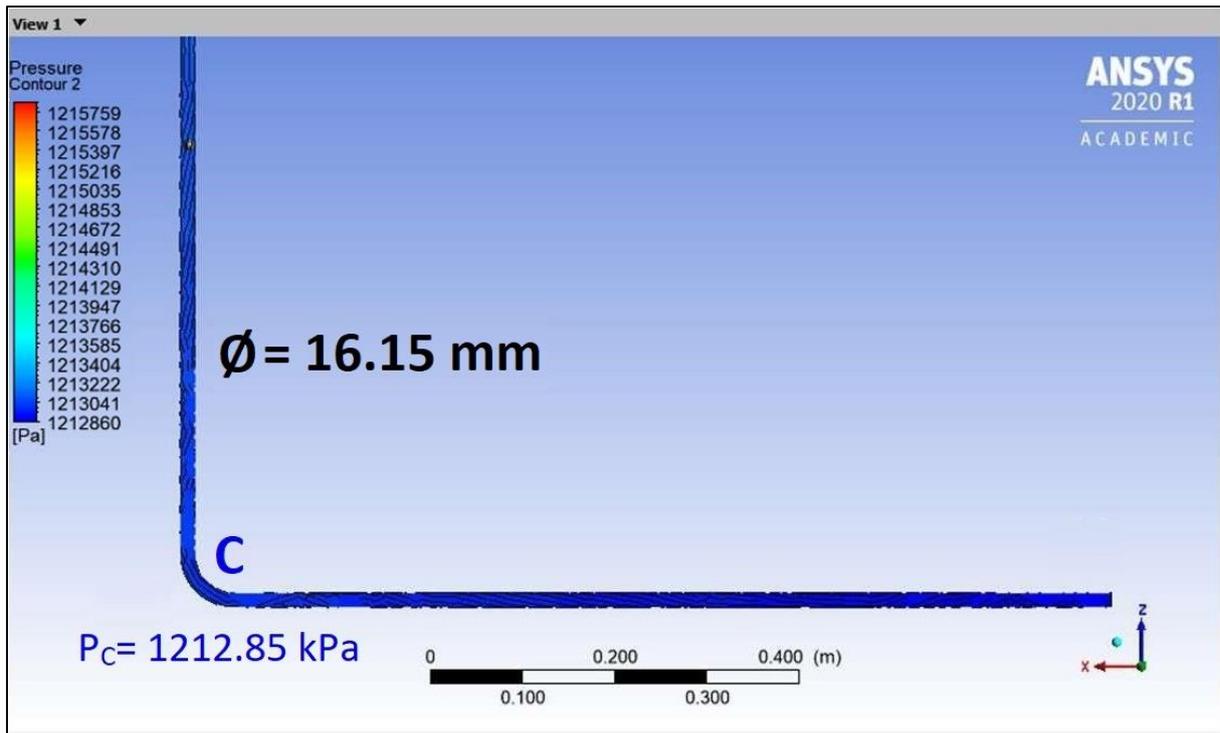


Figura 3.58 Extracto de tramo B-C (16.1 mm)
Fuente: Propia

- **Comparación entre resultados de simulación con diferentes diámetros**

En la Tabla 3.17 se presenta los resultados de la caída de presión entre la simulación de los diámetros calculados y de catálogo de la red de distribución del Laboratorio de Tecnología Industrial (LTI).

Tabla 3.17 Comparación de caída de presión simulada entre diámetro calculado y de catálogo

Tramo	Diámetro calculado (mm)	Diámetro catálogo (mm)	ΔP Diam. Calculado (kPa)	ΔP Diam. Catálogo (kPa)
A-B	18.46	22.2	1.51	1.28
B-D	13.96	13.4	1.56	1.71
B-C	16.15	17.2	1.57	1.36

Fuente: Propia

A pesar de que ambas tuberías son simuladas, se ve la influencia de la caída de presión en el diámetro calculado y de catálogo, por lo tanto, en el tramo A-B con diámetro calculado la caída de presión es de 1.51 (kPa), mientras que con diámetro de catálogo la caída de presión es de 1.28 (kPa), disminuye la caída de presión ya que el diámetro escogido en el catálogo es mayor, lo mismo sucede en el tramo B-C.

3.10 Análisis de sensibilidad con diferentes materiales

- **Simulación con diferentes materiales**

A continuación, se presenta la simulación de la red real (diámetros de catálogo) con distintos materiales investigados: Acero, Cobre y PVC.

- Simulación en ANSYS con material acero: A continuación, se presenta la simulación en las figuras: Figura 3.59, Figura 3.60, Figura 3.61 y en el Anexo E.

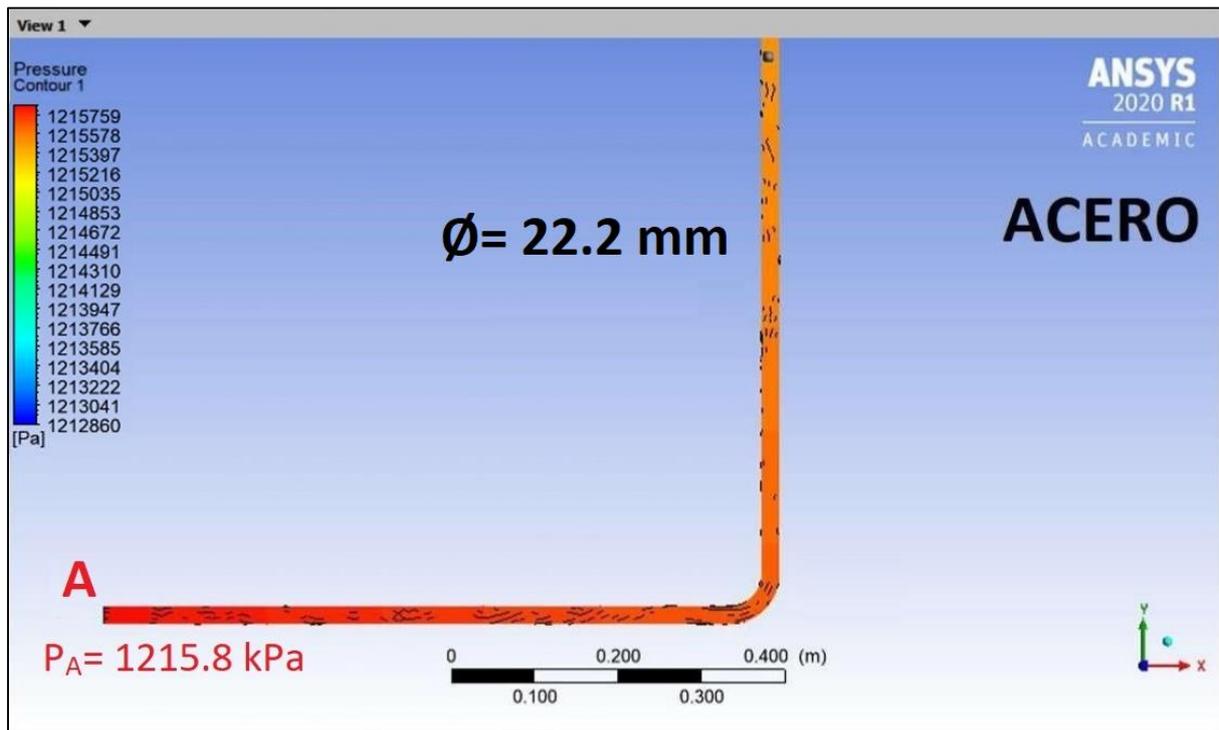


Figura 3.59 Extracto de tramo A-B (Acero)
Fuente: Propia

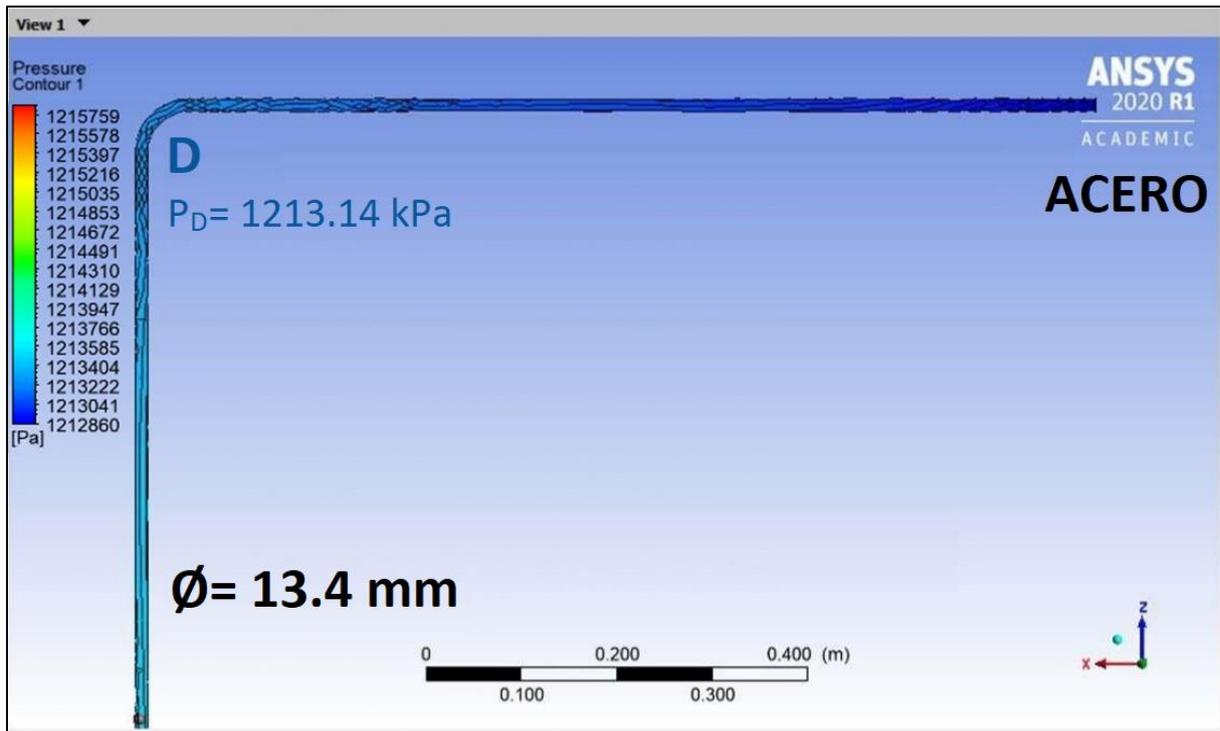


Figura 3.60 Extracto de tramo B-D (Acero)
Fuente: Propia

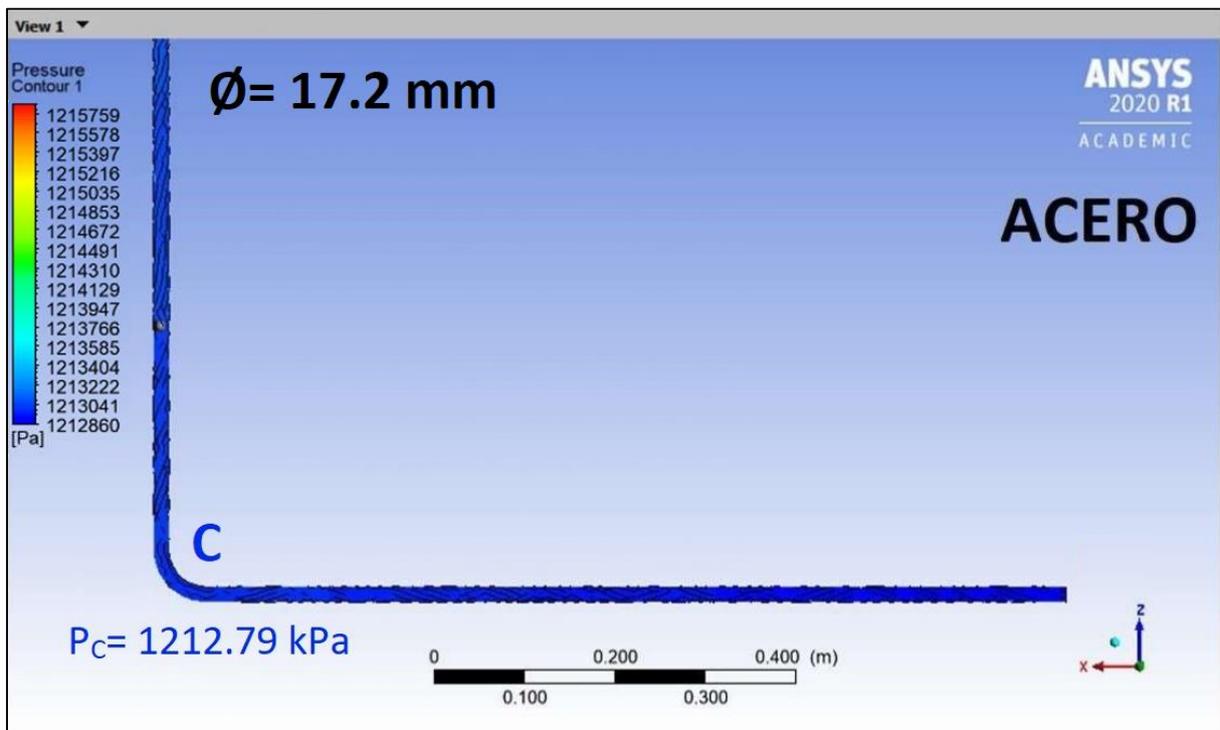


Figura 3.61 Extracto tramo B-C (Acero)
Fuente: Propia

- Simulación en ANSYS con material cobre: A continuación, se presenta la simulación en las figuras: Figura 3.62, Figura 3.63, Figura 3.64 y en el Anexo E.

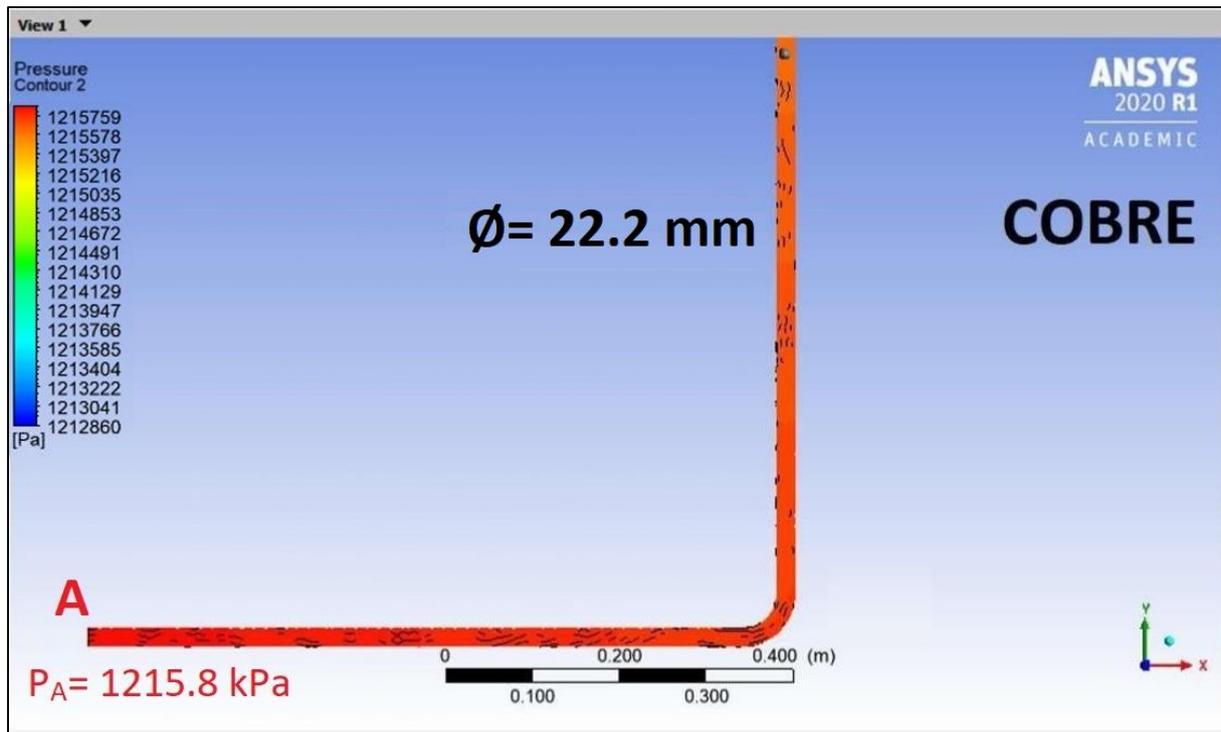


Figura 3.62 Extracto tramo A-B (Cobre)
Fuente: Propia

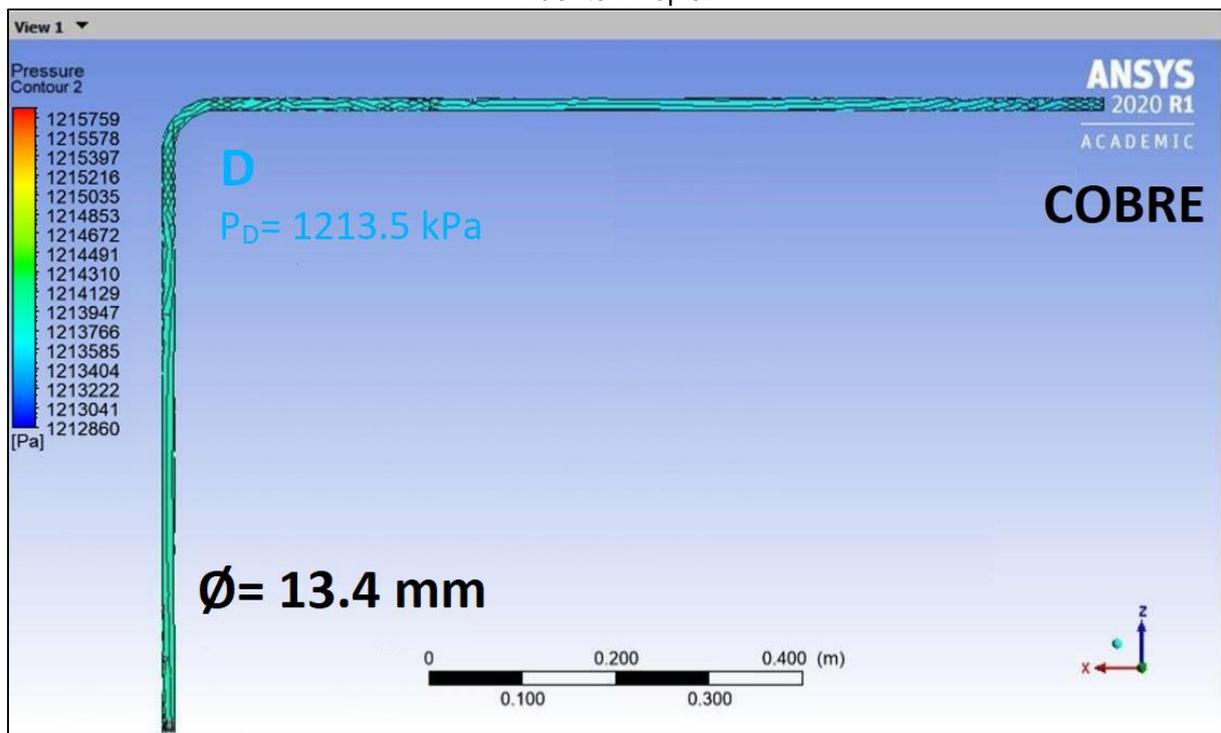


Figura 3.63 Extracto de tramo B-D (Cobre)
Fuente: Propia

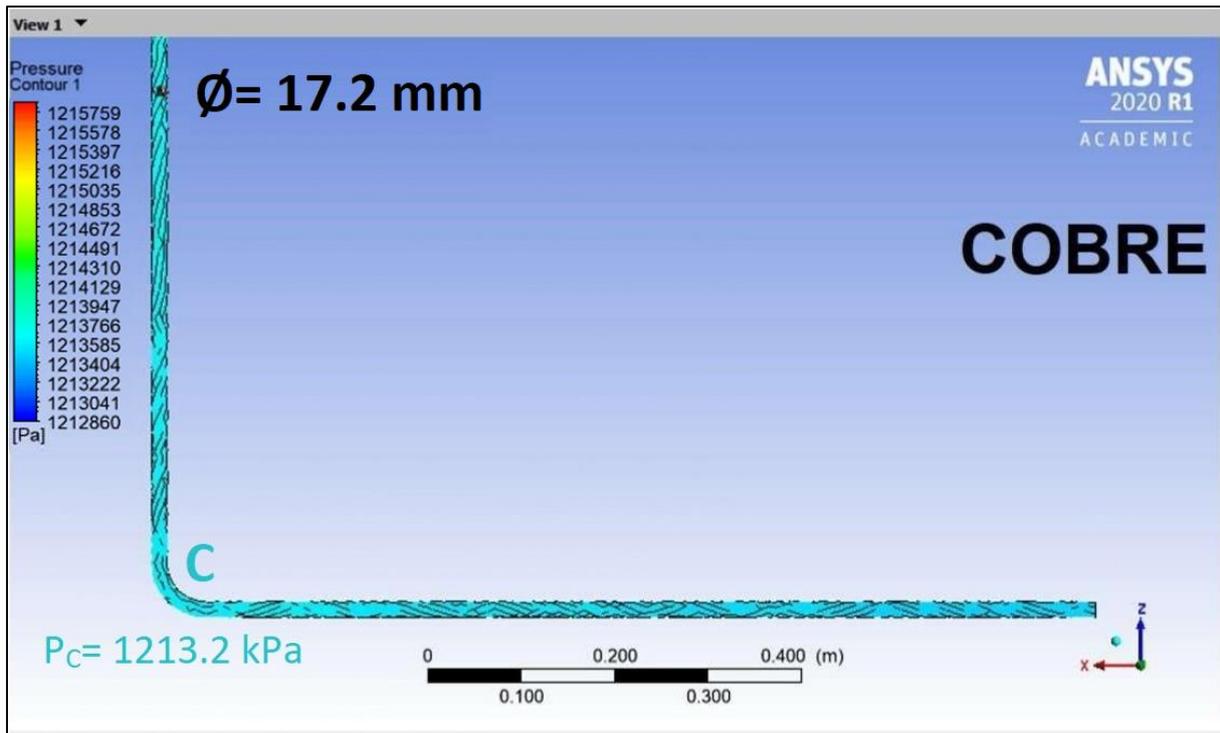


Figura 3.64 Extracto de tramo B-C (Cobre)
Fuente: Propia

- Simulación en ANSYS con material PVC: A continuación, se presenta la simulación en la figuras: Figura 3.65, Figura 3.66, Figura 3.67 y en el Anexo E.

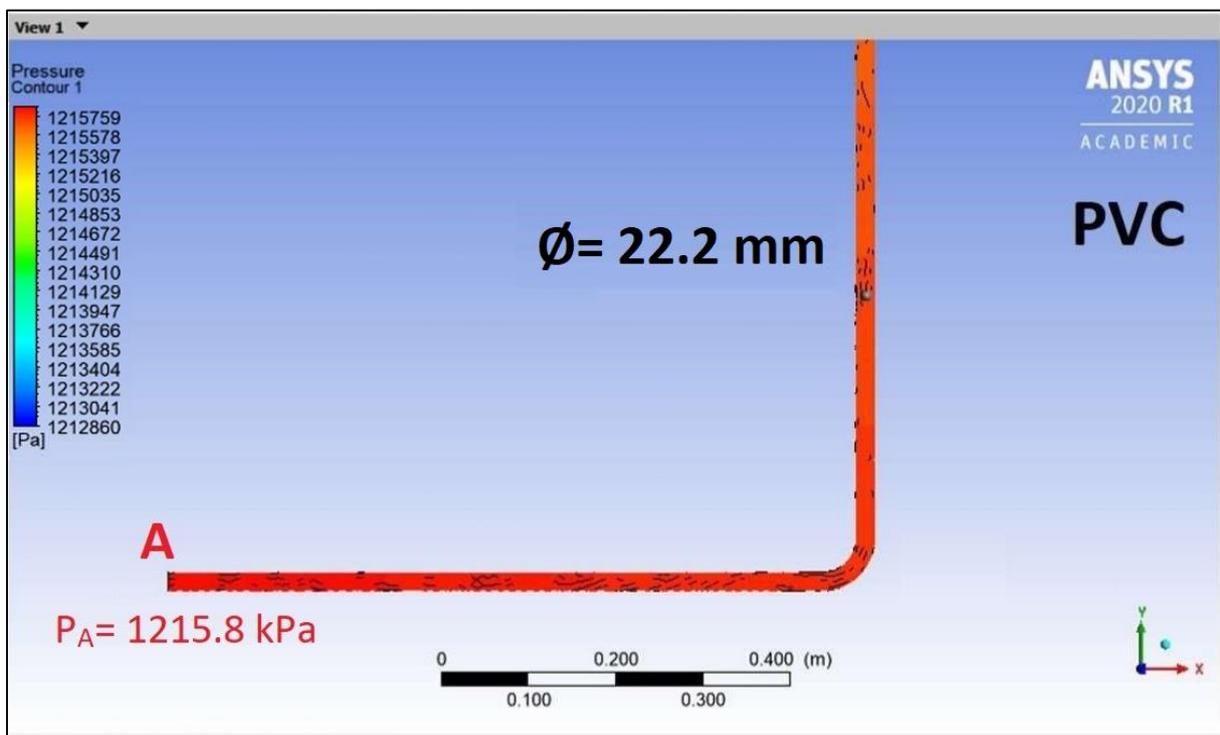


Figura 3.65 Extracto del tramo A-B (PVC)
Fuente: Propia

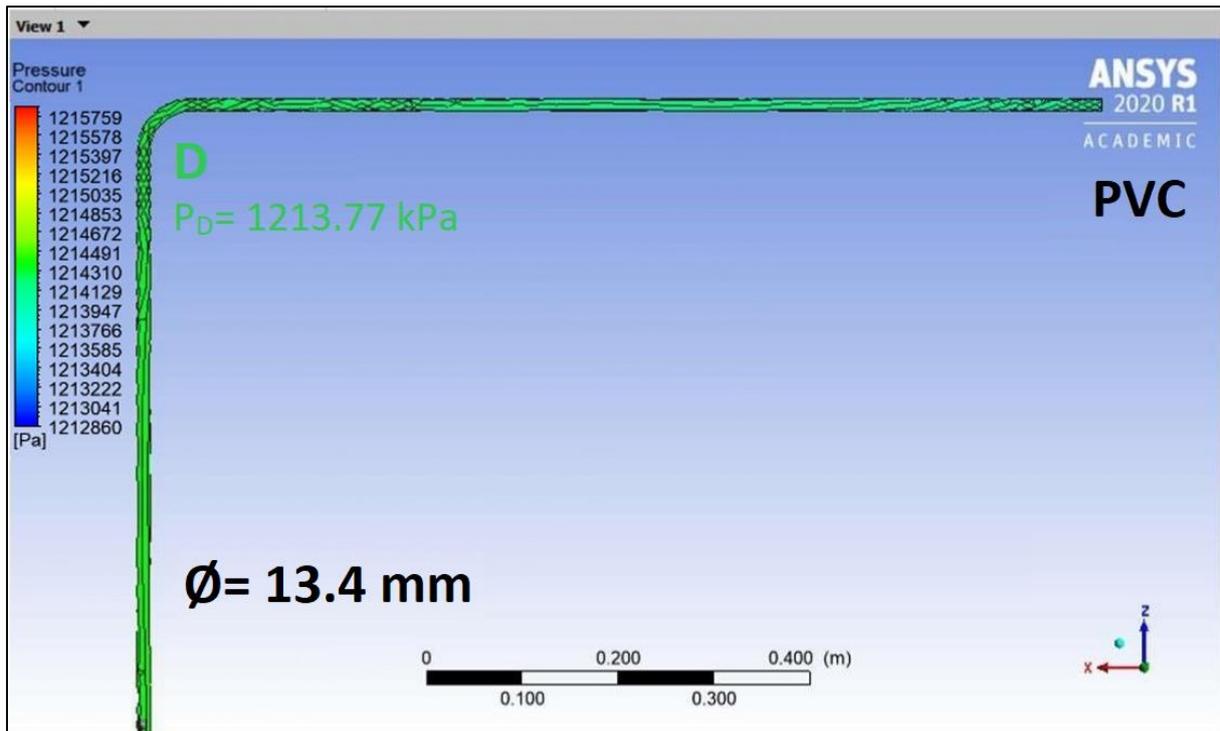


Figura 3.66 Extracto del tramo B-D (PVC)
Fuente: Propia

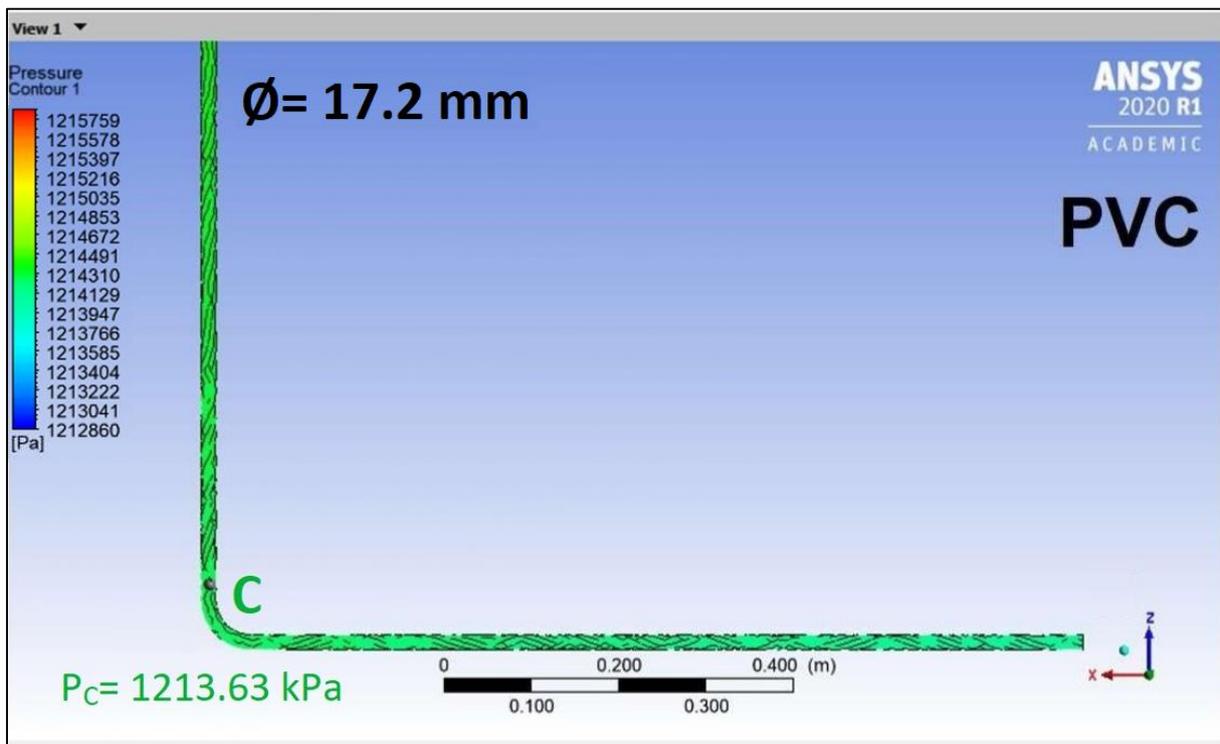


Figura 3.67 Extracto del tramo B-C (PVC)
Fuente: Propia

En la Tabla 3.18 se presenta los resultados de la caída de presión entre la simulación de distintos materiales de la red de distribución del Laboratorio de Tecnología Industrial (LTI).

Tabla 3.18 Comparación de caída de presión simulada entre materiales

Tramos	ΔP Acero (kPa)	ΔP Cobre (kPa)	ΔP PVC (kPa)
A-B	1.28	1.07	0.93
B-D	1.71	1.53	1.22
B-C	1.36	1.23	1.1

Fuente: Propia

Dentro del análisis expuesto, se puede apreciar la influencia de la rugosidad sobre la caída de presión dependiendo el material de la tubería, por lo tanto, en el tramo A-B se puede apreciar que la caída de presión con acero es de 1.28 (kPa), del cobre es de 1.07 (kPa) y del PVC 0.92 (kPa). Siendo el PVC el material que menor caída de presión tiene, ya que posee una menor rugosidad en comparación a los otros materiales presentados.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Se analizaron diferentes métodos de dimensionamiento de tuberías de aire comprimido, consultando libros y catálogos de fabricantes, de esta manera se puede obtener un resultado fiable escogiendo el método más conveniente.
- Al comparar varios métodos se obtuvo que el método más fiable y completo es el método C (fabricante Atlas Copco), teniendo un valor de 1.74% a comparación del método A que utiliza conceptos y fórmulas de mecánica de fluidos, por lo tanto, se utilizó de guía para el dimensionamiento de la red de distribución la bibliografía del método C, ya que es un método sencillo y considera la altitud de Quito.
- Para el dimensionamiento de la red de aire comprimido, se debe conocer los distintos equipos que compondrán en su totalidad la red de servicio de aire comprimido, dado que afecta directamente la presión dentro de la red de distribución, la pérdida de carga en la red y el caudal que va a ser suministrado por el compresor y que va a pasar por los diferentes tramos de tuberías.
- Para el cálculo del diámetro inicial, se escogió una caída de presión recomendada por el fabricante Atlas CopCo de 1.5 (kPa) (en cada tramo de la línea crítica), dado que se seleccionan diámetros reales en catálogos, la caída de presión en cada tramo varía, por lo tanto, la sumatoria de la caída de presión en cada tramo de la línea crítica disminuye de 4.5 (kPa) a 3.6 (kPa) por efecto del aumento en el diámetro del tramo A-B y D-E y la disminución del tramo B-D.
- Se utilizó el software ANSYS para dimensionar la red de aire comprimido, se validó la simulación comparando los resultados respecto a los cálculos de un caso de estudio de una tubería de flujo interno (40 (m) de longitud, 46 (mm) de diámetro interno y 600 (Nm³/h) de caudal). Los resultados de la simulación dieron un valor próximo al método A y C, siendo la simulación con un valor de 13.3 (kPa), método A: 13.39 (kPa) y método C: 13.15 (kPa) de caída de presión.
- Se observa claramente la influencia del tamaño del diámetro interno en la caída de presión, por lo tanto, en el tramo A-B con diámetro calculado (18.56 mm) la caída de presión es de 1.51 (kPa), mientras que con diámetro de catálogo (22.2 mm) la caída de presión es de 1.28 (kPa), esto se ve influenciado dentro de la demanda del consumo energético del compresor, dado que a mayor caída de presión, mayor será la demanda energética lo que conlleva a mayor gasto en producción de aire.
- Mediante las simulaciones realizadas, se puede apreciar la influencia de la rugosidad sobre la caída de presión dependiendo el material de la tubería, por lo

tanto, se observó que el material que tiene menor caída de presión al ser instalado dentro de una red de aire comprimido es el PVC, teniendo una caída de presión en el tramo A-B de 0.92 (kPa), siendo esta de menor valor de caída de presión y menor costo en el mercado.

- Mediante la simulación de una red de aire comprimido, se observó el comportamiento del aire dentro de una red neumática, por lo tanto, se puede obtener una idea clara de cómo podría ser dimensionada una red neumática sin necesidad de ser instalada.

4.2 Recomendaciones

- Es importante comparar varios métodos para poder dimensionar una red de aire comprimido, dado que un solo método podría dar una respuesta errónea y la red podría tener fallas en su funcionamiento.
- Se recomienda buscar información de los dispositivos que pueden conformar la red tanto de catálogos en línea como buscando elementos reales en tiendas especializadas, así facilitará estimar el consumo total de aire que tendrá la red.
- Se debe realizar el dimensionamiento sin accesorios para así estimar el diámetro real de la tubería y así obtener un diámetro aproximado para utilizar la información proporcionada por fabricantes para los accesorios y posteriormente realizar un segundo cálculo considerando los mismos.
- Se recomienda realizar un plano donde se puedan apreciar los accesorios que componen la red de aire comprimido, de esta manera poder contar el número de accesorios iguales dentro de la red para posteriormente obtener la pérdida de carga total de la red que sucede por los accesorios.
- Se debe tomar en cuenta para realizar un diseño 3D en el software de AutoCAD verificar las unidades, dimensiones, longitudes, diámetros externos e internos, para que en la simulación se obtenga una aproximación al resultado.
- Se recomienda tomar en cuenta en la simulación en ANSYS, la extracción del volumen, la creación de una buena malla y la configuración de parámetros del material y fluido que tendrá la red, para de esta manera obtener un resultado cercano a los cálculos realizados.
- Se recomienda utilizar la misma simulación para analizar distintos diámetros y materiales que podrían conformar una red de aire comprimido para comparar el comportamiento del fluido en una misma red.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Croser and F. Ebel, "Pneumatics Basic Level". 2002.
- [2] Atlas Copco, *Compressed Air Manual*, 8th ed. 2015.
- [3] R.C. W. F. W. Haring, M. Metzger, *FESTO*. 2012.
- [4] A. S. Nicolás, *Neumática Práctica*, 1st ed. 2009.
- [5] R. Mott, *Mecánica de fluidos*, 7th ed. 2015.
- [6] J. M. Cimbala and Y. A. Çengel, *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones*, 2nd ed. 2012.
- [7] V. Powerair, "Compresores Herramientas neumáticas Preparación de aire comprimido Distribución de aire comprimido". 2007.
- [8] AUTODESK, "AutoCAD for Mac & Windows | 2D/3D CAD Software | Autodesk." <https://www.autodesk.com/products/autocad/overview?plc=ACDIST&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1#> (accessed Sep. 14, 2020).
- [9] ANSYS, "Engineering Simulation & 3D Design Software | Ansys." <https://www.ansys.com/> (accessed Sep. 14, 2020).
- [10] D. O. Z. J. C. Villacís, "Rediseño del sistema de almacenamiento, tratamiento, transporte y distribución de aire comprimido para el área de pinturas y resinas de la fábrica pinturas CÓNDROR S.A," 2009.
- [11] Haestad Methods, *Advanced Water Distribution Modeling and Management*, 1st ed. 2003.
- [12] A. N. G. Shanbhag, "Recomendaciones para las Tuberías de Aire Comprimido de Descarga del Compresor y Distribución en Fábrica Hitachi Industrial Equipment," vol. 99, pp. 1–8, [Online]. Available: http://www.hitachi-america.us/supportingdocs/forbus/isd/white_papers/Hitachi_White_Paper_Piping_Spanish_LR.PDF.
- [13] WIKA Instrument Corporation, "Economical alternative for OEM applications, Stainless steel case and wetted parts APE ECO-1". 2002.
- [14] FESTO, "Cilindros redondos DSNU/ESNU," 2017.
- [15] Plastigama, "Tubería PVC AF Plastigama.pdf." 2020.
- [16] N. Tang *et al.*, "AIRNET Tabla acero," 2018.
- [17] Productos Nacobre, "Manual Técnico Nacobre," p. 121, 2010.
- [18] CORZAN Industrial Systems, "Especificación de tuberías de CPVC Corzan - Dimensiones y pesos | Corzan." <https://www.corzan.com/es-mx/sistemas-de-tuberias/especificacion/dimensiones-y-pesos> (accessed Oct. 15, 2020).

6. ANEXOS

ANEXO A Planos de ampliación del Laboratorio de Tecnología Industrial (LTI).

ANEXO B Diagrama unifilar de la tubería propuesta para el laboratorio.

ANEXO C Simulación de la tubería de caso de flujo interno.

ANEXO D Simulación de la tubería propuesta para el Laboratorio de Tecnología Industrial (LTI).

ANEXO E Simulación de distintos materiales utilizando la tubería propuesta para el Laboratorio de Tecnología Industrial (LTI).