



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

Instituto Tecnológico de Apizaco

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CALENTADORES DE
AIRE MEDIANTE TUBOS PVC CON OBSTRUCCIONES**

TITULACIÓN INTEGRAL POR TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

**PRESENTA:
HOBED GONZÁLEZ ESQUIVEL**

**NOMBRE DEL ASESOR:
VICENTE FLORES LARA**



APIZACO, TLAX., AGOSTO DE 2025



Tzompán-tepec, Tlaxcala, **25/noviembre/2025.**

Oficio No. MM/740/2025.

ASUNTO: Liberación de Titulación Integral Tesis Profesional.

LIC. CECILIA YARELLY ARREGUÍN LARA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
P R E S E N T E

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para Titulación integral:

Alumno (a):	HOBED GONZÁLEZ ESQUIVEL
Carrera:	INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
No. De Control:	19370450
Nombre del Proyecto:	"ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CALENTADORES DE AIRE MEDIANTE TUBOS PVC CON OBSTRUCCIONES".
Producto:	TITULACIÓN INTEGRAL TESIS PROFESIONAL.

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestros egresados.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Pensar para Servir, Servir para Triunfar

MTRO. JORGE AGUILAR VÁZQUEZ
JEFE DEL DEPTO. DE METAL-MECÁNICA



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO
**DEPARTAMENTO DE
METAL MECÁNICA**

DR. VICENTE FLORES LARA
ASESOR

c.p.- Expediente
Archivo.

JAV*petry.



2025
Año de
**La Mujer
Indígena**





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Apizaco
División de Estudios Profesionales

Tzompantepec, Tlaxcala **28/noviembre/2025**

HOBED GONZÁLEZ ESQUIVEL
EGRESADO(A) DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
CON NÚMERO DE CONTROL 19370450.
P R E S E N T E.

Por este medio, me permito informar a usted que por aprobación de la comisión revisora asignada para valorar el trabajo que mediante la opción **TITULACIÓN INTEGRAL TESIS PROFESIONAL** y cuyo tema es: **"ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CALENTADORES DE AIRE MEDIANTE TUBOS PVC CON OBSTRUCCIONES"**, conforme a lo establecido en el procedimiento para la obtención del Título Profesional en el Instituto Tecnológico, la División de Estudios Profesionales a mi cargo le otorga la:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Debiendo entregar **1 USB** del mismo, apropiadamente empastado, a la brevedad, para presentar su Acto de Recepción Profesional.

Sin otro particular por el momento me despido.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Pensar para Servir, Servir para Triunfar®

CECILIA YARELY ARREGUÍN LARA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO
**DIVISIÓN DE
ESTUDIOS PROFESIONALES**

ccp. Archivo
CYAL/Gsc*



2025
Año de
**La Mujer
Indígena**

Av. Instituto Tecnológico No. 418, San Andrés Ahuashuatepec,
Municipio de Tzompantepec, Tlaxcala, Mex. C.P. 90491 Tel. (241) 4172010
Ext. 304, e-mail: dep_titulacion@apizaco.tecnm.mx | apizaco.tecnm.mx



AGRADECIMIENTOS

A DIOS TODO PODEROSO:

Por darme la salud y la voluntad de mantenerme siempre firme en la realización de mi sueño profesional.

A MIS PADRES:

Con mucho cariño y admiración, por sus sabios consejos, pero principalmente por el amor y cariño que me brindan.

A MI FAMILIA Y AMIGOS:

A quienes, con su apoyo y amistad, alientan y embellecen cada momento de mi vida.

A MIS COMPAÑEROS DE GENERACIÓN:

Por la amistad que a diario me brindaron y los momentos felices compartidos en nuestra estancia universitaria.

A MIS MAESTROS:

Que me supieron conducir hoy y transmitir sus conocimientos hoy a través de la enseñanza; ellos hicieron posible mi formación profesional.

ÍNDICE

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

Planteamiento del Problema

Justificación

Objetivos Generales

Objetivos Específicos

Alcances

Limitaciones

CAPITULO II: ESTADO DE LA TÉCNICA

CAPITULO III: MARCO TEÓRICO

- El factor de fricción
- El factor de fricción en el flujo de fluidos
- Régimen turbulento

Régimen turbulento sólido

Régimen turbulento intermedio

Régimen turbulento rugoso

Rugosidad relativa

Importancia en la ingeniería

- El coeficiente de fricción en superficies sólidas
- Factores que afectan el coeficiente de fricción
- Aplicación del coeficiente de fricción
- Diagrama de Moody

CAPITULO IV: RESULTADOS Y ANALISIS

- Tubería sin Obstrucciones (Caso 1)
- Tubería sin Obstrucciones (Caso 2)
- Tubería con Obstrucciones de Cruz (Caso 1)
- Tubería con Obstrucciones de Cruz (Caso 2)
- Tubería con Obstrucciones de Rampa (Caso 1)
- Tubería con Obstrucciones de Rampa (Caso 2)

CAPITULO V: MATERIALES Y METODOS

Tubo PVC

Aluminio

Madera

Tubo Pitot

Ventilador

Plano de Tubería sin Obstrucciones

Plano de Tubería con Obstrucciones de Cruz

Plano de Tubería con Obstrucciones de Rampa

Conclusiones

Referencias

Índice de Figuras

Índice de Imágenes
FIGURA 1: Los distintos flujos de fluidos.
FIGURA 2: Descripción grafica del contacto entre sólidos.
FIGURA 3: Flujo laminar.
FIGURA 4: Flujo turbulento.
FIGURA 5: Diagrama de Moody.
FIGURA 6: Fotografía de tubo PVC.
FIGURA 7: Rollo de aluminio.
FIGURA 8: Troncos de madera.
FIGURA 9: Obstrucción de Tabla de Madera.
FIGURA 10: Representación Gráfica de Obstrucción de Cruz.
FIGURA 11: Obstrucción de Rampas de Madera.
FIGURA 12: Representación Gráfica de Obstrucción de Rampillas.
FIGURA 13: Columna.
FIGURA 14: Soporte.
FIGURA 15: Base.
FIGURA 16: Soporte unidos a la columna.
FIGURA 17: Base completa.
FIGURA 18: Tubo de Pitot.
FIGURA 19: Referencia de la posición de los tubos Pitot.
FIGURA 20: Ventilador Axial.
FIGURA 21: Diagrama de Proyecto Experimental.

Indicé de Tablas

Indicé de tablas
TABLA 1: Ecuación del régimen laminar.
TABLA 2: Ecuaciones de distintos regímenes turbulentos.
TABLA 3: Datos recabados del tubo sin obstrucciones (Caso 1).
TABLA 4: Datos de temperatura y viscosidad cinemática del tubo sin obstrucciones (Caso 1).
TABLA 5: Datos de temperatura y número de Prandtl del tubo sin obstrucciones (Caso 1).
TABLA 6: Datos recabados del tubo sin obstrucciones (Caso 2).
TABLA 7: Datos de temperatura y viscosidad cinemática del tubo sin obstrucciones (Caso 2).
TABLA 8: Datos de temperatura y número de Prandtl del tubo sin obstrucciones (Caso 2).
TABLA 9: Datos recabados del tubo con obstrucciones de cruz (Caso 1).
TABLA 10: Datos de temperatura y viscosidad cinemática del tubo con obstrucciones de cruz (Caso 1).
TABLA 11: Datos de temperatura y número de Prandtl del tubo con obstrucciones de cruz (Caso 1).
FIGURA 12: Datos recabados del tubo con obstrucciones de cruz (Caso 2).
FIGURA 13: Datos de temperatura y viscosidad cinemática del tubo con obstrucciones de cruz (Caso 2).
FIGURA 14: Datos de temperatura y número de Prandtl del tubo con obstrucciones de cruz (Caso 2).
FIGURA 15: Datos recabados del tubo con obstrucciones de rampa (Caso 1).
FIGURA 16: Datos de temperatura y viscosidad cinemática del tubo con obstrucciones de rampa (Caso 1).
FIGURA 17: Datos de temperatura y número de Prandtl del tubo con obstrucciones de rampa (Caso 1).
FIGURA 18: Datos recabados del tubo con obstrucciones de rampa (Caso 2).
FIGURA 19: Datos de temperatura y viscosidad cinemática del tubo con obstrucciones de rampa (Caso 2).
FIGURA 20: Datos de temperatura y número de Prandtl del tubo con obstrucciones de rampa (Caso 2).

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

En los estudios de mecánica de fluidos, hidráulica e ingeniería de materiales, uno de los conceptos más relevantes para comprender el movimiento de los fluidos a través de tuberías es el factor de fricción.

El factor de fricción constituye un parámetro esencial dentro de la hidráulica y la mecánica de fluidos, ya que describe la resistencia que experimenta un fluido al desplazarse a través de una tubería. Este concepto está directamente relacionado con las pérdidas de energía por fricción que ocurren durante el flujo, y que deben ser consideradas en el diseño de cualquier sistema de transporte de líquidos. En términos prácticos, el factor de fricción permite calcular la pérdida de carga, es decir, la reducción de presión a lo largo de una conducción debido a la interacción entre el fluido y la pared interna del tubo.

En el caso de los tubos de PVC (Policloruro de Vinilo), el análisis de este factor adquiere gran relevancia, puesto que este material es ampliamente empleado en instalaciones de agua potable, riego agrícola, drenajes pluviales y aplicaciones industriales. Una de sus principales ventajas radica en su baja rugosidad relativa, que en comparación con tuberías metálicas u otros materiales tradicionales, disminuye las pérdidas de carga y favorece una mayor eficiencia hidráulica. Esta característica convierte al PVC en un material idóneo para sistemas donde se requiere un transporte de fluidos eficiente, confiable y económico. Sin embargo, aunque el PVC presenta un bajo coeficiente de rugosidad, esto no significa que esté exento de pérdidas por fricción. Con el tiempo, los depósitos minerales, las obstrucciones o la presencia de un flujo turbulento pueden incrementar considerablemente la resistencia al paso del fluido. Por ello, estudiar la relación entre el factor de fricción y los tubos de PVC resulta esencial y de gran importancia para cual usos de sus aplicaciones para ingenieros civiles, hidráulicos, mecánicos y diseñadores de sistemas de transporte de agua o fluidos.

Planteamiento del Problema

La problemática central radica en determinar qué efecto tienen las obstrucciones en el desempeño térmico e hidráulico de un calentador de aire experimental construido con tubos de PVC, buscando un equilibrio entre la eficiencia en la transferencia de calor y las pérdidas de presión generadas en el sistema.

Justificación

El desarrollo de tecnologías accesibles y sostenibles para el calentamiento de aire es de gran importancia en la búsqueda de soluciones energéticas eficientes y de bajo costo. El uso de tubos de PVC con obstrucciones internas representa una propuesta innovadora, económica y de fácil implementación, que puede contribuir tanto en el ámbito doméstico como en el sector agrícola e industrial. Este proyecto no solo permite comprender el comportamiento térmico de sistemas alternativos, sino que también fomenta la optimización de recursos y el impulso de energías limpias, ofreciendo una alternativa práctica frente a equipos sofisticados y complejos.

Objetivos General

Evaluar el desempeño térmico e hidráulico de un calentador de aire experimental fabricado con tubos de PVC que incorporen obstrucciones internas, con el fin de analizar su viabilidad como alternativa de bajo costo para aplicaciones de calentamiento de aire.

Objetivos Específicos

- Diseñar y construir un prototipo de calentador de aire con tubos de PVC que incluyan diferentes configuraciones de obstrucciones.
- Medir la variación de temperatura del aire a la entrada y salida del sistema en condiciones experimentales controladas.
- Analizar el efecto de las obstrucciones y comparar el rendimiento térmico obtenido.

Alcances

- Se diseñará un sistema experimental que utilice tubos de material PVC con diferentes configuraciones de obstrucciones internas para evaluar su comportamiento en el calentamiento del aire.
- Se analizarán características parámetros como la pérdida de carga, temperatura del aire en la salida, la eficiencia térmica del sistema bajo condiciones controladas del flujo y el calentamiento.
- Se realizarán pruebas con distintos tipos de obstrucciones con formas diferentes, así como diferentes distribuciones y números de obstrucciones para poder determinar cual tiene el mejor balance entre transferencia de calor y caída de presión.

Limitantes

- El material PVC tiene una resistencia térmica limitada, lo cual restringe la temperatura máxima en el aire, por lo cual las condiciones de operaciones del experimento no sean precisas.
- El experimento se realizará a nivel laboratorio, por lo que los resultados pueden no ser eficazmente realizables en sistemas industriales a gran escala sin modificaciones adicionales.
- El flujo del aire puede catalogarse como laminar, turbulento o estacionario dependiendo del caudal, además de no abordarse fenómenos transitorios complejos ni externas fluctuaciones.
- El proyecto se enfoca en el factor de fricción y no incluye análisis detallados de costos, vida útil del material utilizado ni mantenimiento a largo plazo.

CAPITULO II: ESTADO DE LA TÉCNICA

El desarrollo de sistemas de calentamiento de aire ha sido objetivo de muchas investigaciones en estos últimos años a causa de la creciente necesidad de aprovechar fuentes de energía y reducir el consumo de combustibles fósiles en aplicaciones de climatización, procesos industriales y secado de productos. Los calentadores de aire normalmente están contruidos con metales como el acero y el aluminio, por su gran conductividad térmica y resistencia a temperaturas altas.

Recientes investigaciones han revelado la importancia de optimizar la geometría de las obstrucciones internas de los conductos para lograr un mejor equilibrio entre la caída de presión y la transferencia de calor. Un ejemplo son los estudios experimentales con tubos metálicos equipados con anillos espaciados ha mostrados un incremento de un 40% en la eficiencia térmica, pero con un aumento normal de la fricción.

Sin embargo, la mayoría de estos trabajos se centran en sistemas mecánicos, por lo que el uso del PVC como material principal para la conducción y calentamiento de aire es todavía limitado y poco documentado. Debido principalmente a las limitaciones térmicas del material, ya que su punto de ablandamiento se encuentra en torno a los 60-70 °C. Pero debido a su bajo costo, resistencia química y fácil fabricación lo hace ideal para aplicaciones en bajas temperaturas o para trabajos experimentales de bajo consumo energético.

En aspecto experimental, muchos proyectos han empleado tubos de material PVC en investigaciones de transferencia de calor forzada con fluidos a temperatura moderada, demostrando que, mediante el control adecuado de temperatura de entrada y la instalación de obstrucciones internas, es posible tener mejoras destacables en el calentamiento del aire sin comprometer la integridad del material. Estos resultados demuestran la posibilidad de usar sistemas de calentamiento de aire con material PVC para aplicaciones domésticas y rurales.

ANTECEDENTES DE PROYECTOS SEMEJANTES

- Obstáculos montados en ductos de aire (Estudio Experimental)

Trabajos de tipo experimental han instalado obstrucciones como bloques, perfiles transversales de tipo delta/winglets, y perforaciones en ductos circulares y rectangulares en calentadores solares de aire y se ha demostrado con mediciones un aumento del coeficiente de transferencia (Nusselt), caída de presión y eficiencia térmica. Estos experimentos han demostrado mejoras de transferencia entre 10%-80% dependiendo de la forma geométrica y régimen de Reynolds, con un aumento de fricción que es variable según la obstrucción.

- Rugosidad artificial y aletas de interrumpidas

En estudios que introducen rugosidad artificial como aletas interrumpidas, costillas y delta/winglets reportan que la variación del espaciador, la altura y forma de optimizar la ganancia térmica a diferencia de la penalización de pérdida. Las investigaciones con parámetros de altura, posición angular y pitch son muy normales para el diseño de configuraciones que maximicen la relación térmico-hidráulica.

- Obstrucciones perforadas y bloques con hueco.

Las configuraciones con bloques perforados han sido evaluadas experimentalmente para ser estudiadas respecto a la transferencia en flujos turbulentos y caída de presión. Estos diseños buscan la recirculación local sin bloquear la sección completamente, logrando un buen equilibrio entre aumento de Nusselt y caída de presión.

- Estudio comparativo (CFD + experimentales)

Proyectos de investigación recientes han combinado CFD y ensayos experimentales para validar diseños de aletas V, doble paso o semi-conductos transversales, lo que ayuda a entender mejor los campos de velocidad/temperatura

y a optimizar las ubicaciones y formas de obstrucciones antes de la construcción experimental.

ASPECTOS TÉCNICOS Y METODOLOGÍA EXPERIMENTALES

- Forma geométrica

Ductos circulares o rectangulares con una pared calentada y otra aislada, inserción de obstrucciones en patrón transversal o longitudinal. En caso de los tubos PVC puede usarse como ductos redondos o cascaras, pero se tiene de tomar en cuenta que se debe controlar su temperatura máxima.

- Instrumentación

Termopares a lo largo del tubo como en las entradas y salidas y en puntos intermedios, cámaras termográficas o sondas superficiales para perfiles de temperatura, anemómetro o medidor de caudal, manómetro de pérdida de carga.

- Variables controladas

Potencia/flujo térmico en la pared, temperatura ambiente, geometría de las obstrucciones (grosor, perforación, separación y altura), caudal del aire y número de Reynolds.

- Parámetros de rendimiento

Aumento porcentual de la eficiencia térmica, factor de rendimiento térmico-hidráulico (razón entre aumento de Nusselt y aumento de factor de fricción) temperatura del aire en la salida, pérdida de carga y energía útil colectada.

RESULTADOS GENERALES REPORTADOS

1. Las obstrucciones transversales y rugosidades artificiales aumentan la transferencia térmica significativamente, pero su beneficio depende del régimen y del diseño. Configuraciones optimizadas mantienen ganancias térmicas con aumentos mínimos de pérdida de carga.

2. Obstrucciones perforadas y diseños interrumpidos como bloques con hueco y aletas partidas demuestran buena capacidad de aumentar, mezcla y reducir formación de capas límites sin bloquear del todo el flujo, lo cual ayuda a minimizar la caída de presión con comparación con obstrucciones macizas.
3. Estudios comparativos demuestran que la combinación de CFD + validación experimental acelera la sección de geometrías prometedoras antes de construir el proyecto experimental.

OPORTUNIDADES DE INVESTIGACIÓN APLICABLES AL PROYECTO

- Proyectos experimentales con tubos PVC con obstrucciones internas

Hay muchos experimentos en ductos metálicos y placas con aletas, pero hay pocos estudios públicos que examinen el comportamiento mecánico-termodinámico y térmico-hidráulico de los tubos PVC con obstrucciones internas sometido a condiciones directas de calentamiento como exposición al sol. Este es el vacío que el proyecto puede llenar.

- Optimización de geometría obstrucción vs límite térmico del PVC

Realizar configuraciones que maximicen la eficiencia sin exceder la temperatura segura para el PVC. Obstrucciones que puedan aumentar el intercambio, pero reduzca la temperatura superficial local mediante mezcla.

- Ciclo de vida y envejecimiento del PVC

Evaluar la durabilidad y cambios del rendimiento con el tiempo.

Validación CFD + experimento sobre PVC

Diseñar térmicamente el sistema agregando propiedades térmicas variables del PVC y validar con procedimientos experimentales para generar resultados.

LIMITACIONES ESPECÍFICAS DEL PVC

- Limite térmico

El PVC convencional empieza a perder rigidez y sufrir deformaciones a temperaturas bajas, usualmente por encima de los 60 °C a 70 °C continuos. Se indica que se debe evitar temperaturas altas. Materiales como el CPVC O PEX son más recomendables para temperaturas más altas. Esto es critico ya que en muchos calentadores de aire la pared caliente puede exceder fácilmente estas temperaturas. Por lo tanto, debe de evaluarse cuidadosa y experimentalmente la temperatura superficial máxima y la resistencia térmica del material PVC antes de su aplicación en elementos estructurales o conductos permanentes.

- Compatibilidad con exposición solar y envejecimiento

La radiación UV y ciclos térmicos aceleran la degradación. Por tanto, se recomienda un recubrimiento o materiales alternativos si la exposición es constante.

- Seguridad

Para que no se degrade la materia se recomienda asegurar su temperatura y emisiones. Evitar el uso del PVC en contacto directo con superficies que puedan alcanzar temperaturas que degraden el PVC y genere liberación de compuestos.

Practicidad

Si se insiste en utilizar el PVC ya sea por coste o disponibilidad, se debe de considerar que solo se puede usar en rangos de temperatura controlados. También se puede optar por usar CPVC o materiales más resistentes al calor para las zonas de mayor temperatura.

CAPITULO III: MARCO TEÓRICO

EL FACTOR DE FRICCION

Este término se define como una cantidad adimensional, se utiliza en la ingeniería y en física, ya que nos ayuda a describir la resistencia de un fluido o entre dos superficies en contacto. El termino se usa normalmente en dos áreas, las cuales son el flujo de fluidos a través de conductos y tuberías, y el contacto entre sólidos.

- El flujo de fluidos: En este caso, el factor de fricción es un elemento importante en la ecuación de Darcy-Weisbach, el cual permite calcular la perdida de presión debido a la fricción cuando un fluido fluye a través de un tubo. En esta aplicación el factor de fricción depende de muchas variables, como lo es la velocidad de fluido, las propiedades del mismo fluido (viscosidad y densidad), el diámetro del tubo y la rugosidad relativa de las paredes internas. **(FIGURA 1)**
- Contacto entre solidos: En este contexto, el termino factor de fricción puede referirse al coeficiente de fricción, el cual es una medida que define como “fuerza resistiva” que se opone al movimiento relativo de dos superficies de contacto. **(FIGURA 2)**

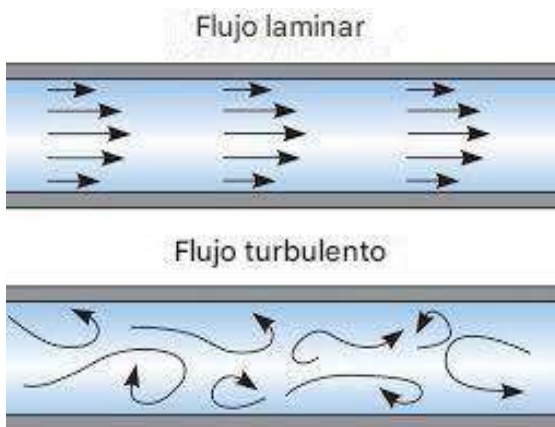


FIGURA 1: Los distintos flujos de fluidos.

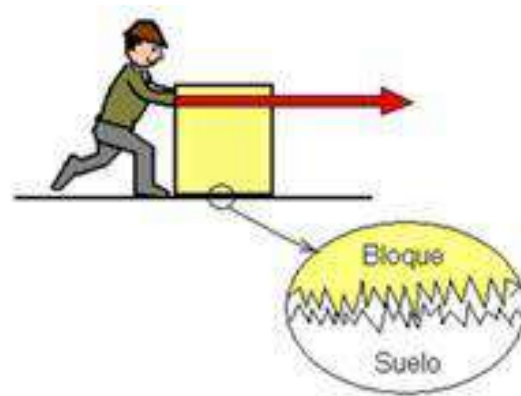


FIGURA 2: Descripción grafica del contacto entre sólidos.

EL FACTOR DE FRICCIÓN EN EL FLUJO DE FLUIDOS

Cuando tenemos un fluido que fluye a través de un tubo, sus movimientos se encuentran limitados por las paredes del tubo, lo cual genera una resistencia al fluido a causa de las propiedades viscosas del flujo y entre la pared del tubo y el fluido. Esta resistencia provoca una pérdida de presión, la cual podemos calcular utilizando el factor de fricción.

Normalmente se denota el factor de fricción como f , el cual es una cantidad adimensional que se tiene relación entre la pérdida de presión y la energía cinética del flujo. Este parámetro es importante para la ecuación de Darcy-Weisbach el cual es una formula empírica que relaciona la pérdida de presión a causa de la fricción a lo largo de un tubo dada a la velocidad media del flujo del fluido.

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2}$$

Donde:

ΔP : Pérdida de presión a lo largo del tubo.

f : Factor de fricción.

L : Longitud del tubo.

D : Diámetro del tubo.

ρ : Densidad del fluido.

v : Velocidad promedio del fluido.

Determinar el factor del fluido

El valor del factor de fricción (f) depende del régimen de flujo si es turbulento o laminar, además de la rugosidad del tubo y el número de Reynolds (Re) el cual es parámetro adimensional que caracteriza el tipo de flujo.

Régimen laminar

En este caso un flujo laminar "cuando Re es menor a 2000", el flujo es ordenado y son paralelas sus líneas de corriente. Para este caso, el factor de fricción se calcula con una ecuación simple:

$$f = \frac{64}{Re}$$

En este régimen, el factor de fricción es independiente de la rugosidad relativa y depende únicamente del número de Reynolds. **(FIGURA 3)**

Donde Re Se describe como:

$$Re = \frac{pvD}{\mu}$$

μ : Viscosidad dinámica del fluido

Esta ecuación se muestra que el fluido laminar, f disminuye de manera inversa con el aumento del número de Reynolds.

Régimen	Coeficiente de fricción	Dependencia
Laminar	$f_{laminar} = \frac{64}{Re}$	$f_{laminar} = f(Re)$

TABLA 1: Ecuación del régimen laminar.

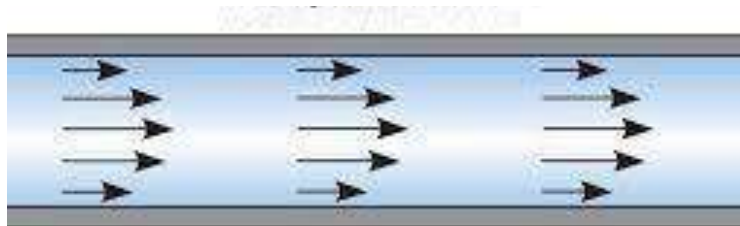


FIGURA 3: Flujo laminar.

Régimen turbulento

En este caso un flujo turbulento (cuando Re es mayor a 4000), las interacciones dentro del fluido provocan que el cálculo del factor de fricción sea mucho más complejo. El valor de f depende de la rugosidad relativa (ϵ) del tubo y el número de Reynolds. Se utiliza normalmente el diagrama de Moody o ecuaciones empíricas como la de Colebrook-White para determinar f :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

Esta ecuación es implícita, por lo que f debe de calcularse iterativamente. Además, que se calcula en función del tipo de régimen turbulento que tenga los cuales mostraremos a continuación.

Régimen turbulento liso

Para el régimen turbulento liso utilizamos la 1er fórmula de Karmann-Prandtl.

$$f_{\text{turbulento liso}} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

El factor de fricción es independiente de la rugosidad relativa y depende únicamente del número de Reynolds.

Régimen turbulento intermedio

Para el régimen turbulento intermedio utilizamos la fórmula de Colebrook de manera simplificada.

$$f_{\text{turbulento intermedio}} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = 1,8 \cdot \log \left(\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{\epsilon_r}{3,7} \right)^{1,11} \right)$$

El factor de fricción depende tanto de la rugosidad relativa como del número de Reynolds.

Régimen turbulento rugoso

Para el régimen turbulento rugoso utilizamos la 2da ecuación de Karmann-Prandtl.

$$f_{turbulento\ rugoso} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log\left(\frac{\varepsilon_r}{3,7}\right)$$

El factor de fricción solamente depende de la rugosidad y del diámetro interno del tubo.

Existen otras ecuaciones que nos ayudan a emplear en régimen turbulento rugoso, en la de Swamee y Jain.

$$f = \frac{0,25}{\left[\log_{10} \left(\frac{k/D}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2}$$

Respecto a lo anterior, el coeficiente de fricción puede determinarse de forma gráfica mediante el diagrama de Moody.

Una vez conociendo el coeficiente de fricción procedemos a calcular la perdida de carga en una tubería debida a la fricción mediante la ecuación de Darcy Weisbach.

Régimen	Coeficiente de fricción	Dependencia
Turbulento liso	$f_{turbulento\ liso} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log\left(\frac{2,51}{Re\sqrt{f}}\right)$	$f_{turbulento\ liso} = f(Re)$
Turbulento intermedio	$f_{turbulento\ intermedio} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = 1,8 \cdot \log\left(\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon_r}{3,7}\right)^{1,11}\right)$	$f_{turbulento\ intermedio} = f(Re, \varepsilon_r)$
Turbulento rugoso	$f_{turbulento\ rugoso} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log\left(\frac{\varepsilon_r}{3,7}\right)$	$f_{turbulento\ rugoso} = f(\varepsilon_r)$

TABLA 2: Ecuaciones de los distintos regímenes turbulentos.



FIGURA 4: Flujo turbulento.

Rugosidad relativa

La rugosidad describe las imperfecciones del tubo en su superficie interna, en caso de tuberías completamente lisas, el factor de potencia solo dependerá del número de Reynolds, f estará influenciado por las características de la rugosidad.

Importancia en la ingeniería

El factor de fricción es importante para diseñar sistemas de tuberías con el objetivo de hacerlas eficientes. Dependerá de los ingenieros prever las pérdidas de presión y configurar de manera adecuada las bombas y válvulas para mantener el flujo requerido.

EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN EN SUPERFICIES SÓLIDAS

Representa la relación entre la fuerza de fricción F_f y la fuerza normal F_N entre dos superficies en contacto:

$$\mu = \frac{F_f}{F_N}$$

Existen dos tipos principales:

- Fricción estática (μ_s): Se define como la resistencia al inicio del movimiento.
- Fricción cinética (μ_k): Se define como la resistencia durante el movimiento continuo.

Factores que afectan el coeficiente de fricción

Naturaleza de la superficie: La dureza y rugosidad del influyen directamente en μ .

- Presencia de lubricantes o contaminantes: El coeficiente de fricción baja cuando tiene contacto directo con lubricantes entre la superficie, además de que los contaminantes como puede ser barro o humedad alteran la fricción de forma impredecible.
- Velocidad relativa: Dependiendo el material μ varia con la velocidad de deslizamiento A bajas velocidades, domina la fricción estática (mayor que la cinética) y a velocidades altas, puede haber lubricación hidrodinámica o formación de película de aire, reduciendo la fricción.

El coeficiente de fricción no es un valor fijo, este depende de las propiedades físicas de los materiales y el entorno en donde ocurre el contacto.

Aplicación del coeficiente de fricción

Debido a su papel que tiene el coeficiente de fricción en la descripción de la resistencia al movimiento entre superficies de contacto, tiene aplicaciones importantes en diversas áreas de la ingeniería como lo es la construcción, el transporte y la mecánica. Estas aplicaciones permiten garantizar la seguridad, mejorar la eficiencia de sistemas, y optimizar diseños.

- Construcción: El coeficiente de fricción es importante ya que se utiliza para evaluar y garantizar la estabilidad de una estructura y prevenir fallos.
- Transporte: Nos ayuda a la medición y optimización de la tracción en los neumáticos en distintas condiciones (lluvia o sol).
- Ingeniería mecánica: En esta área el coeficiente de fricción nos ayuda en los diseños, operaciones y análisis de componentes de un automóvil como sus frenos, embragues, rodamientos, cilindros, etc.

DIAGRAMA DE MOODY

Es una tabla con la representación gráfica en escala doble del factor de fricción en función del número de Reynolds y la rugosidad relativa de una tubería, diagrama hecho por Lewis Ferry Moody. **(FIGURA 5)**

El diagrama de Moody es como un mapa hidráulico que permite encontrar de manera rápida el factor de fricción a partir del número de Reynolds y la rugosidad relativa, facilitando el cálculo de pérdidas de carga en tuberías. Así, el diagrama permite predecir el comportamiento del flujo y estimar la energía necesaria para mover fluidos en sistemas de tuberías.

Se pueden diferenciar dos situaciones diferentes, en primer caso en que el flujo sea laminar y en el segundo caso en que el flujo sea turbulento.

- En el primer caso (Flujo laminar): como ya habíamos comentado con anterioridad, en este caso solo el factor de fricción depende solamente del número de Reynolds, para calcularlo se usa una expresión de la fórmula de Poiseuille.
- En el segundo caso (Flujo turbulento): en este caso el factor de fricción depende tanto del número de Reynolds como de la rugosidad relativa del tubo. Para calcularlo se usa la fórmula de Colebrook-White o algunas otras cómo la fórmula de Miller, fórmula de Haaland, fórmula de Barr.

En el caso del flujo turbulento se presenta mediante una familia de curvas, una para cada valor del parámetro k/D , donde k es el valor de la rugosidad absoluta, es decir la longitud (normalmente en milímetros) de la rugosidad directamente medible en el tubo.

El diagrama de Moody es una herramienta gráfica esencial para determinar el factor de fricción en tuberías, considerando el régimen de flujo y la rugosidad. Su importancia radica en que permite calcular las pérdidas de energía en sistemas

hidráulicos y de transporte de fluidos, siendo aplicable en ingeniería civil, mecánica, hidráulica, química y ambiental.

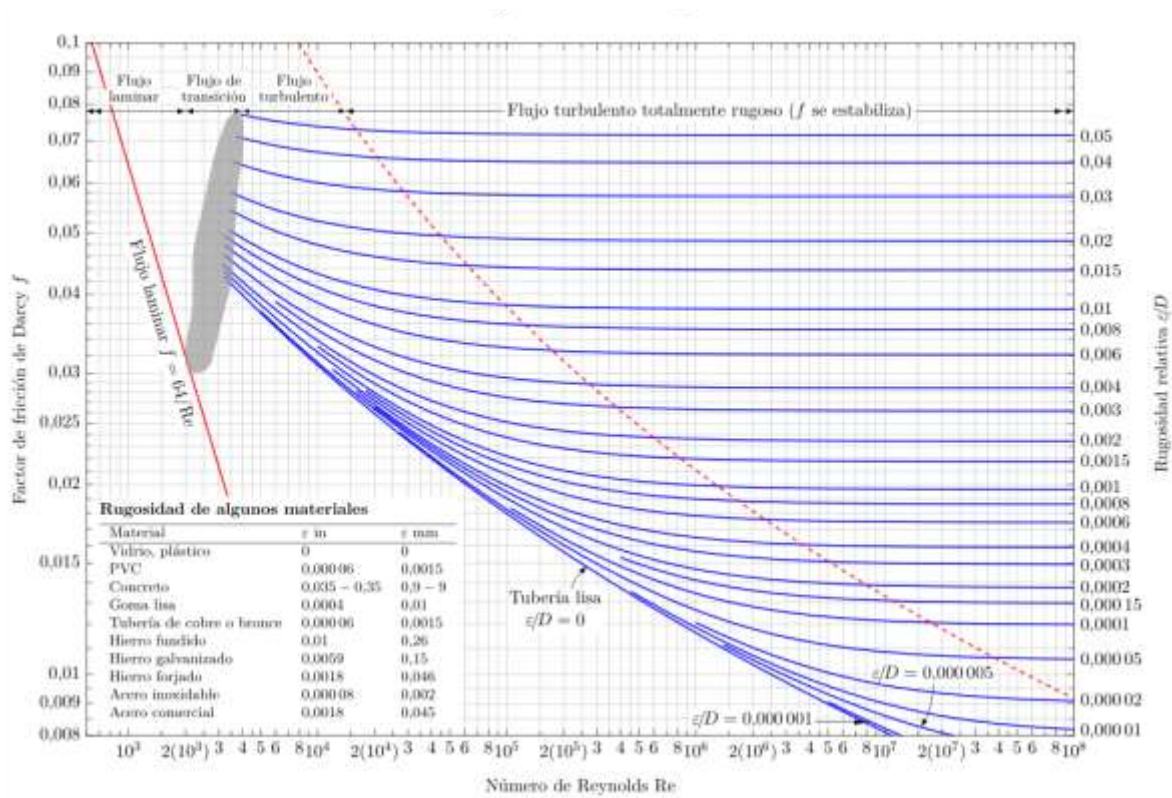


FIGURA 5: Diagrama de Moody

CAPITULO IV: MATERIALES Y MÉTODOS

MATERIALES

Tubos de PVC: El material principal el cual se utilizó fue el tubo PVC, fabricados de polímero termoplástico llamado policloruro de vinilo, que se fabrica a partir del cloro, hidrógeno y carbono. Se utilizaron 2 tubos PVC de 2 pulgadas de diámetro y 6 metros de largo los cuales se cortaron 2 metros en cada tubo para que quedarán con 4 metros cada uno, después los pedazos sobrantes de los tubos que se cortaron, se unieron para formar un tercer tubo de 4 metros. Lo culés deja un total de 3 tubos PVC de 4 metros de largo y con un diámetro de 2 pulgadas.



FIGURA 6: Fotografía de tubo PVC

Aluminio: Después se utilizó como 2do material al aluminio en presentación de papel aluminio para forrar los 3 tubos PVC, esto con el fin de que el aluminio administre todo el calor a lo largo del tubo PVC y que no se concentrara nada más en la entrada el tubo. El un metal ligero, plateado y uno de los más abundantes del planeta después del silicio. Este material lo utilizamos para que el calor se distribuya de manera homogénea en toda la superficie del tubo y pueda calentarse por igual.



FIGURA 7: Rollo de aluminio

Madera: Para las obstrucciones y los soportes para sostener los tubos PVC se utilizó madera, un material natural y orgánico que viene de los troncos de los árboles y de otras plantas leñosas. por su precio y su accesibilidad se contempló para el proyecto experimental para fabricar los soportes de los tubos, para que estos puedan quedar en forma horizontal.



FIGURA 8: Troncos de Madera

Obstrucción de Cruz

Para el primer tubo PVC se utilizó 5 tablas planas de madera con las siguientes características:

Espesor: 0.5 cm

Longitud: 60 cm

Ancho: 2 pulgadas

Cada tabla se pone en fila dentro del tubo en fila, cada una de las tablas están cruzadas respecto a su espesor lo cual se genera una instrucción de forma de Cruz.

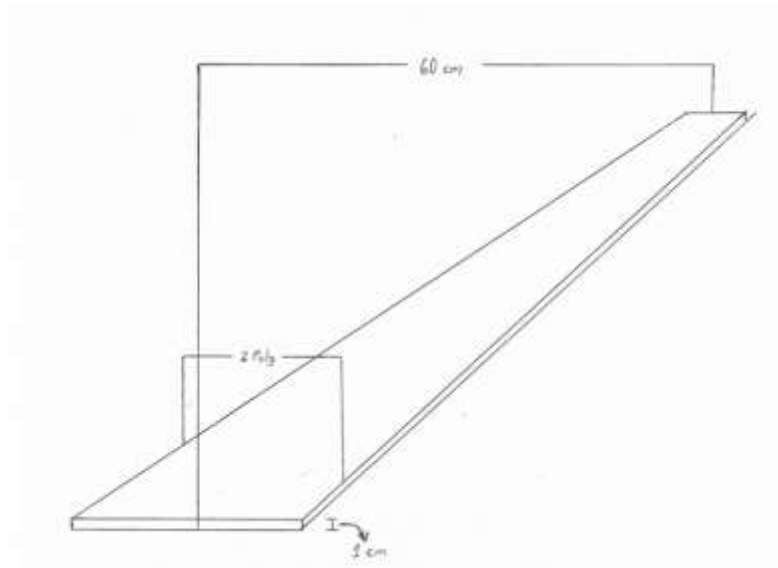


FIGURA 9: Obstrucción de Tabla de Madera

Las obstrucciones quedarían de la siguiente manera:

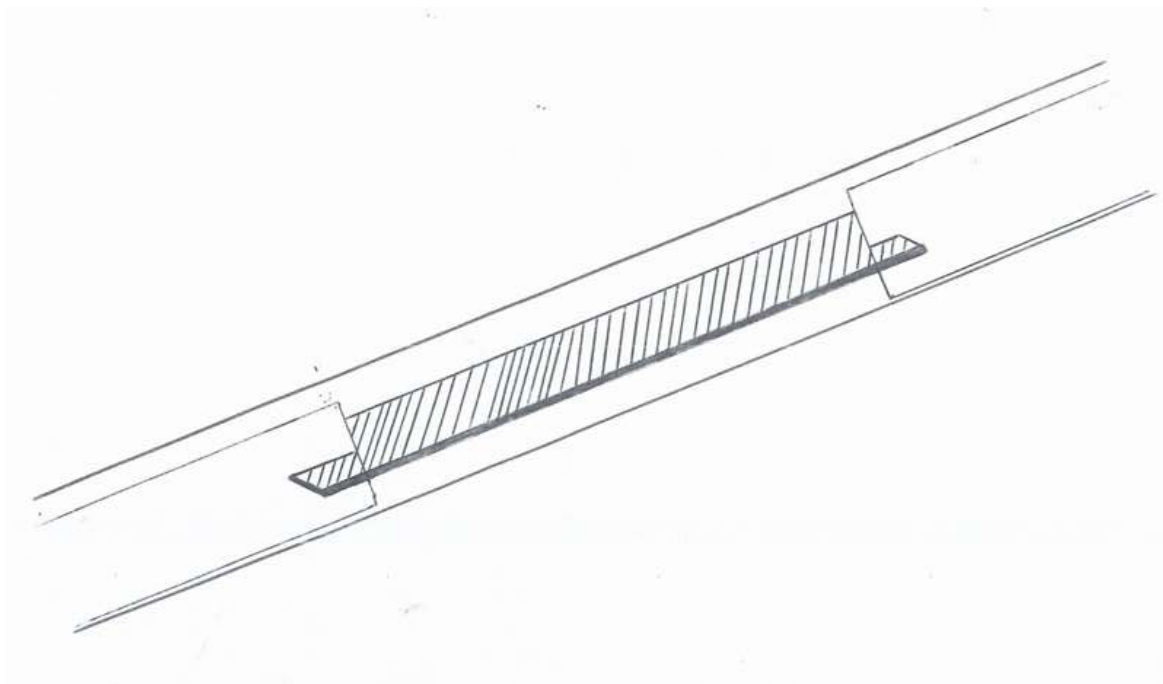


FIGURA 10: Representación Gráfica de Obstrucción de Cruz

Obstrucción de Rampilla

Para el segundo tubo PVC se utilizó 10 rampillas de madera con las siguientes características:

Espesor: 1 pulgadas

Longitud: 20 cm

Ancho: 2 pulgadas

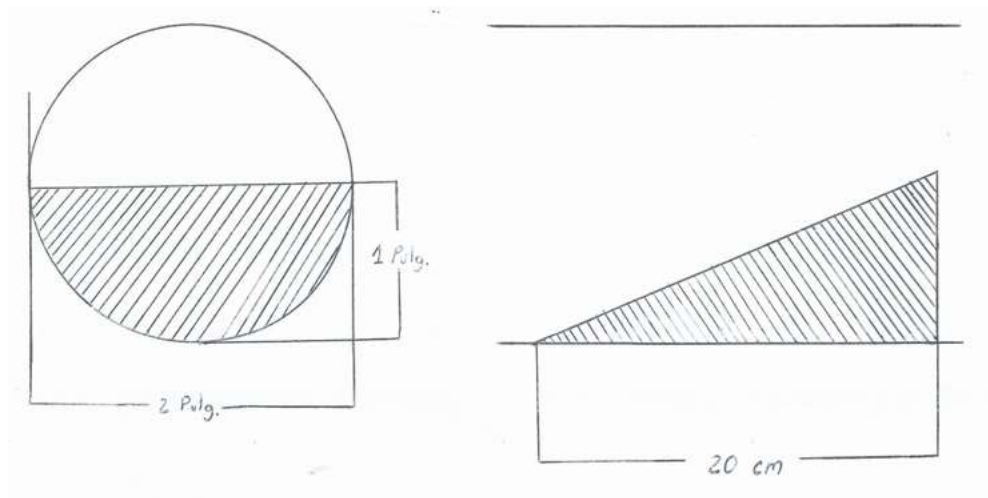


FIGURA 11: Obstrucción de Rampas de Madera

Las obstrucciones quedarían de la siguiente manera:

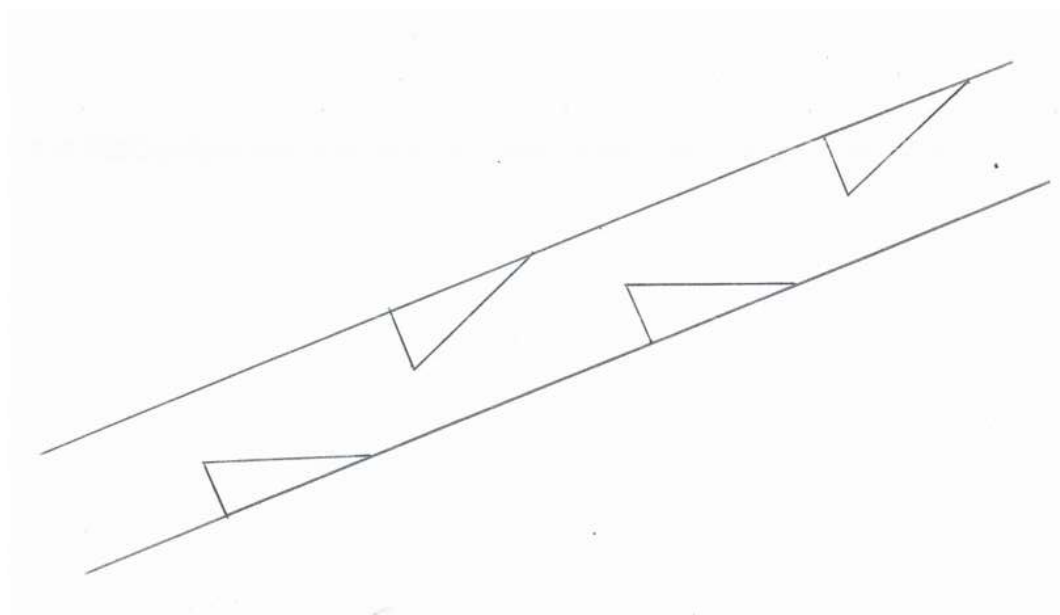


FIGURA 12: Representación Gráfica de Obstrucción de Rampillas

Para las bases para los tubos PVC se utilizó madera para fabricarlos con las siguientes características:

Para las columnas de las bases se utilizaron 3 tablas de madera con las siguientes medidas:

Espesor: 5 cm

Longitud: 30 cm

Ancho: 5 cm

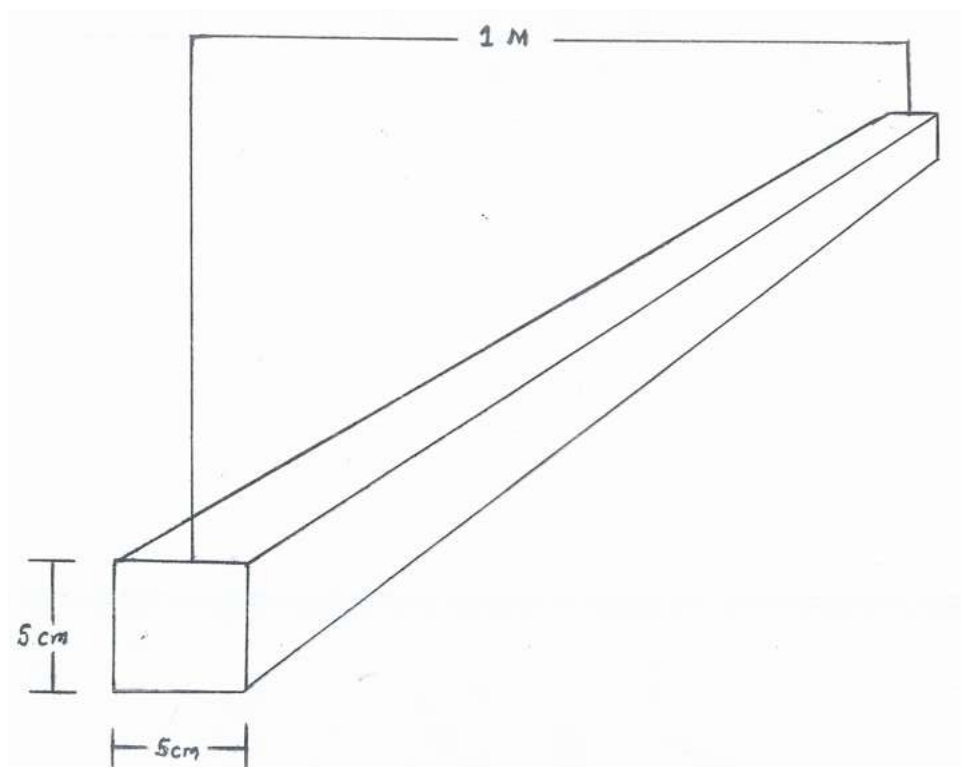


FIGURA 13: Columna

Para la del soporte de la columna se utilizaron las siguientes medidas:

Espesor: 5 cm

Longitud: 30 cm

Ancho: 5 cm

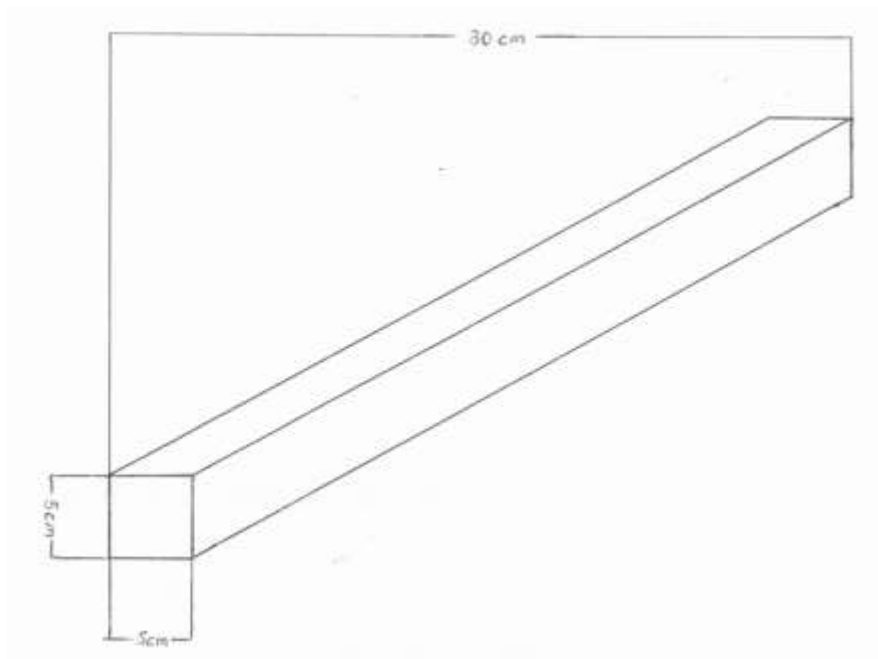


FIGURA 14: Soporte

Para las bases en donde descansa los tubos tienes las siguientes medidas.

Espesor: 5 cm

Longitud: 60 cm

Ancho: 2.5 cm

Cortes: 3 pulgadas

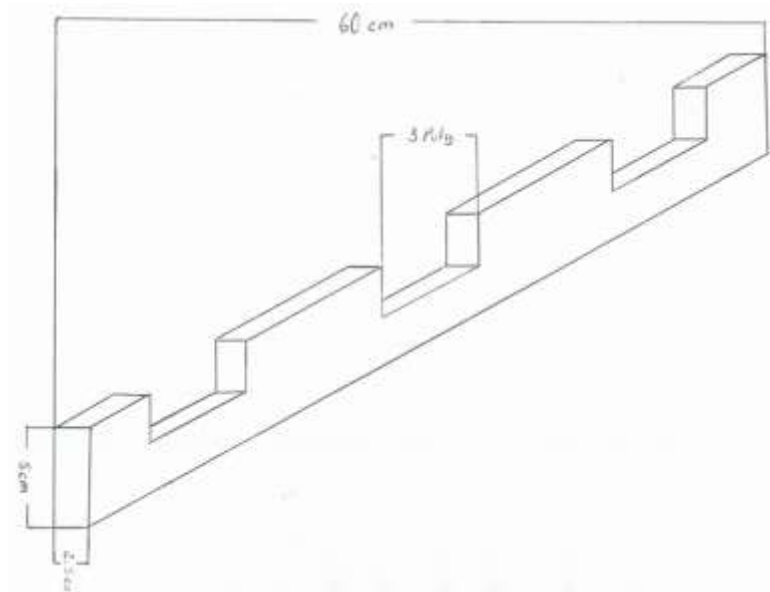


FIGURA 15: Base

Para unir los soportes a la columna, los unimos de forma cruzada para que la columna quede en medio de los soportes de la siguiente forma.

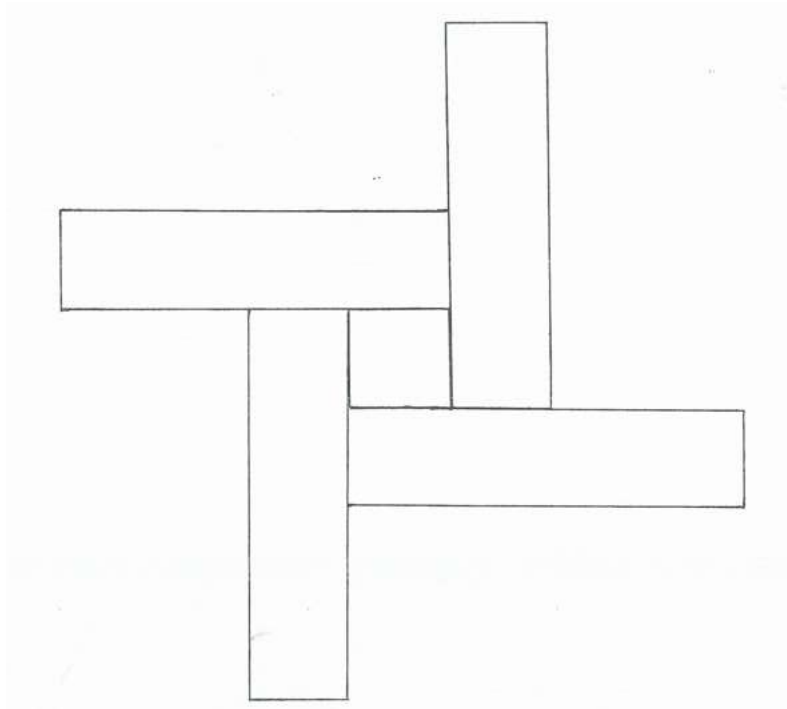


FIGURA 16: Soporte unidos a la columna

Después unimos la base con la columna para que nos quede de la siguiente forma.

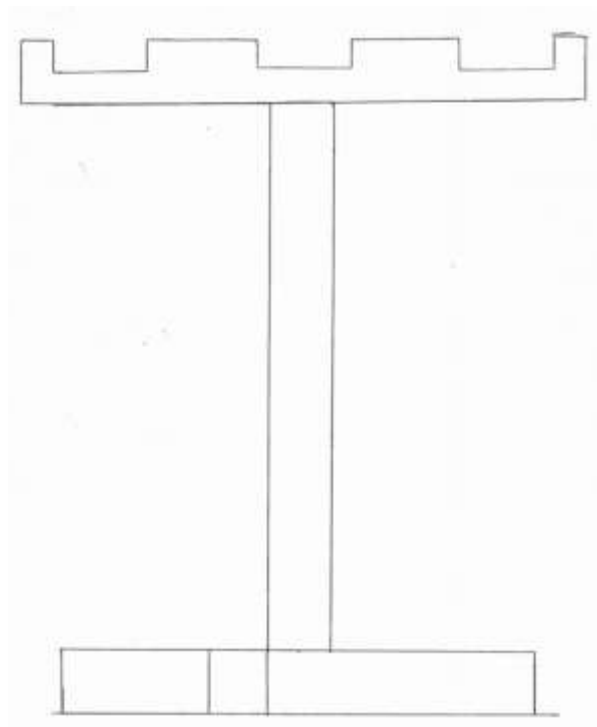


FIGURA 17: Base completa

HERRAMIENTAS

Tubo de Pitot: Esta herramienta nos ayudara a calcular la presión total que se encuentra en los 3 tubos PVC de diferentes obstrucciones. El tubo de Pitot consiste de un tubo de apunta al flujo que se desea medir. Dentro del tubo se encuentra un líquido cuya presión estancamiento permite determinar la velocidad del flujo.



FIGURA 18: Tubo de Pitot

Para este proyecto experimental utilizaremos 2 tubos de Pitot, el primer tubo de Pitot está ubicado al inicio del tubo PVC, antes de las obstrucciones, el segundo tubo de Pitot está en al final del tubo PVC, después de las obstrucciones.

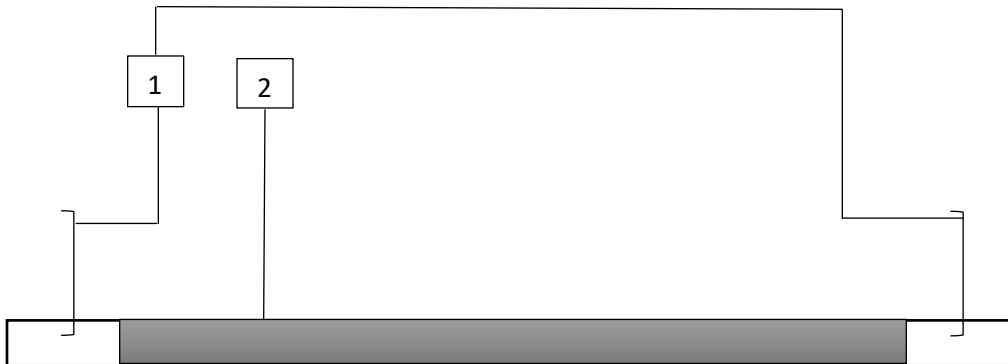


FIGURA 19: Referencia de la posición de los tubos Pitot

1. Tubos de Pitot

2. Zona de Obstrucciones en el Tubo PVC

Ventilador axial: Este instrumento con un motor y un conjunto de aspas llamado ventilador axial que giran para mover el aire, transformando la energía mecánica en energía cinética para crear un flujo y generar presión. Se utilizó para introducir y conducir aire a través de los ductos, Tubos PVC con obstrucciones, ya que su función principal son calentar los tubos PVC para calcular su temperatura de entrada y salida del aire.



FIGURA 20: Ventilador Axial

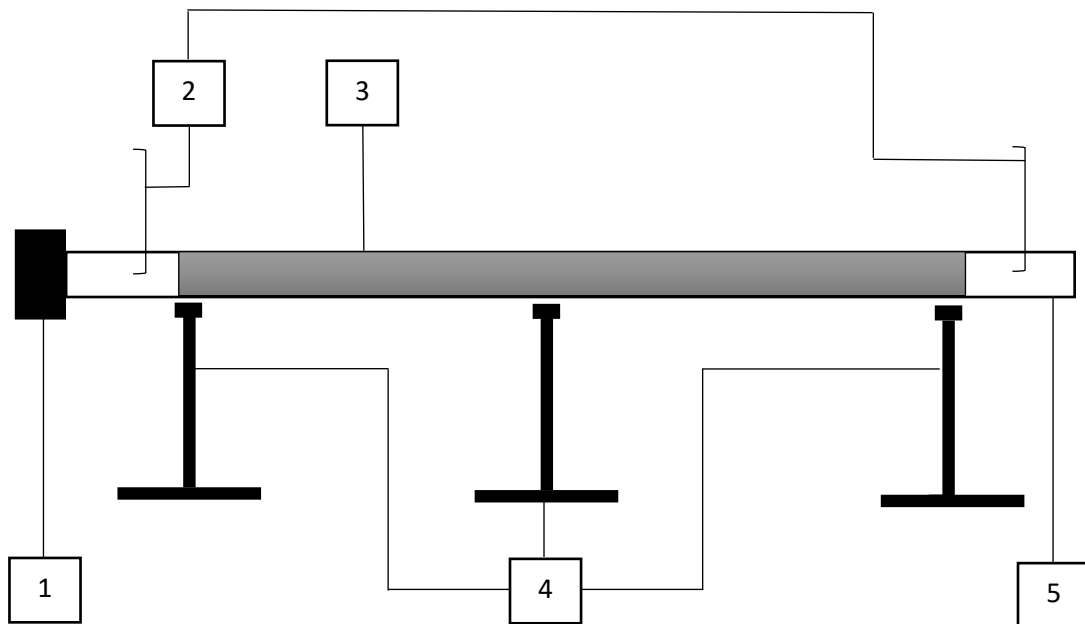
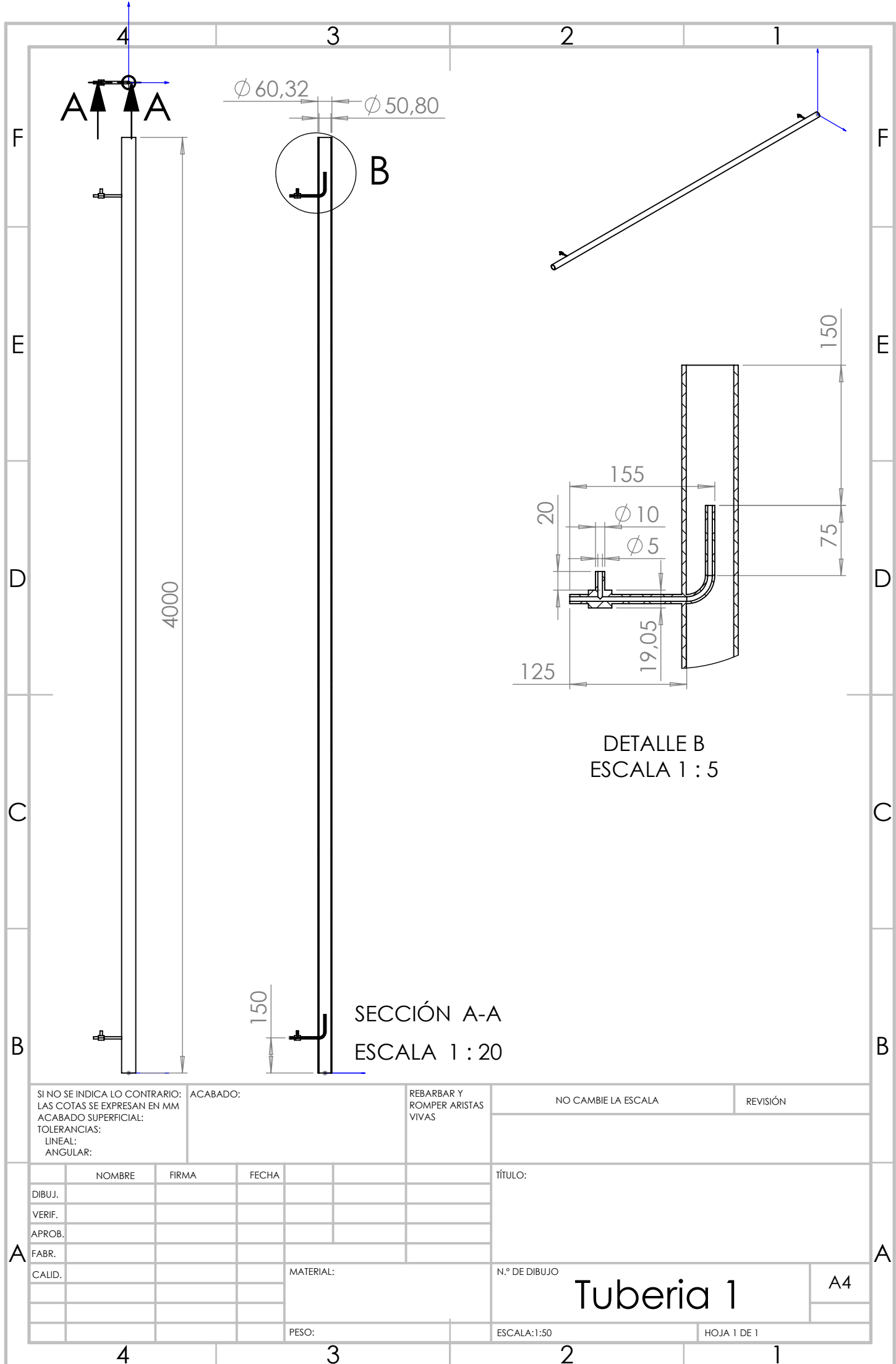
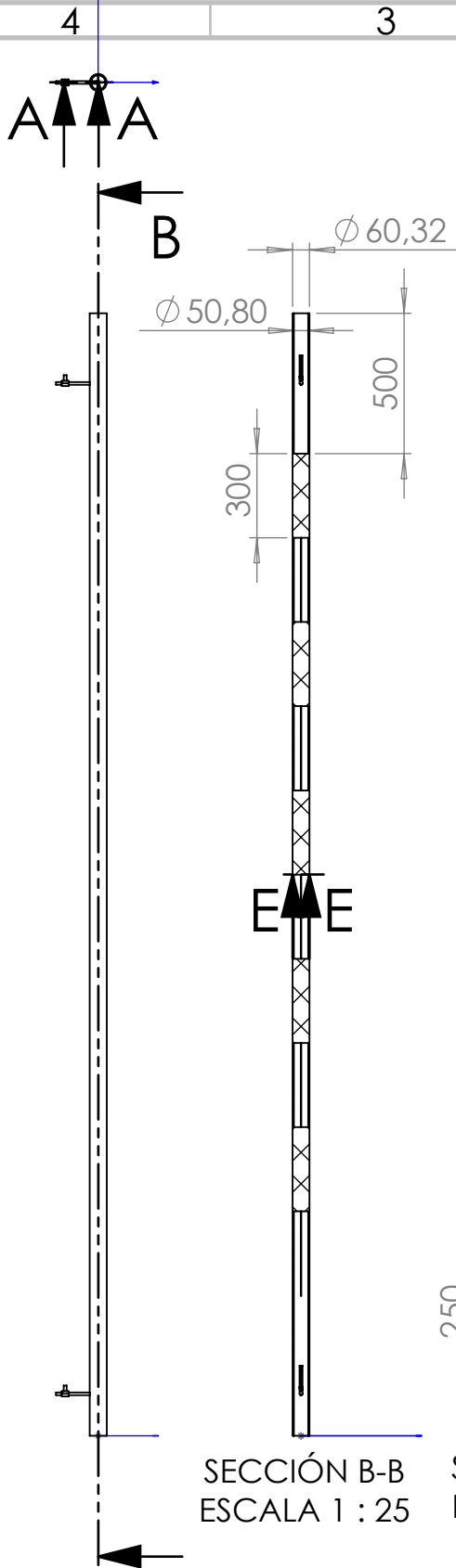


FIGURA 21: Diagrama de Proyecto Experimental

1. Ventilador Axial.
2. Tubos de Pitot.
3. Zona de Obstrucciones en el Tubo PVC.
4. Soportes.
5. Tubo PVC forrado con aluminio.





SECCIÓN B-B
ESCALA 1 : 25

SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 25

SECCIÓN E-E
ESCALA 1 : 5

DETALLE D
ESCALA 2 : 25

DETALLE C
ESCALA 2 : 25

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO EL ACABADO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM.
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				

MATERIAL:

PESO:

TÍTULO:

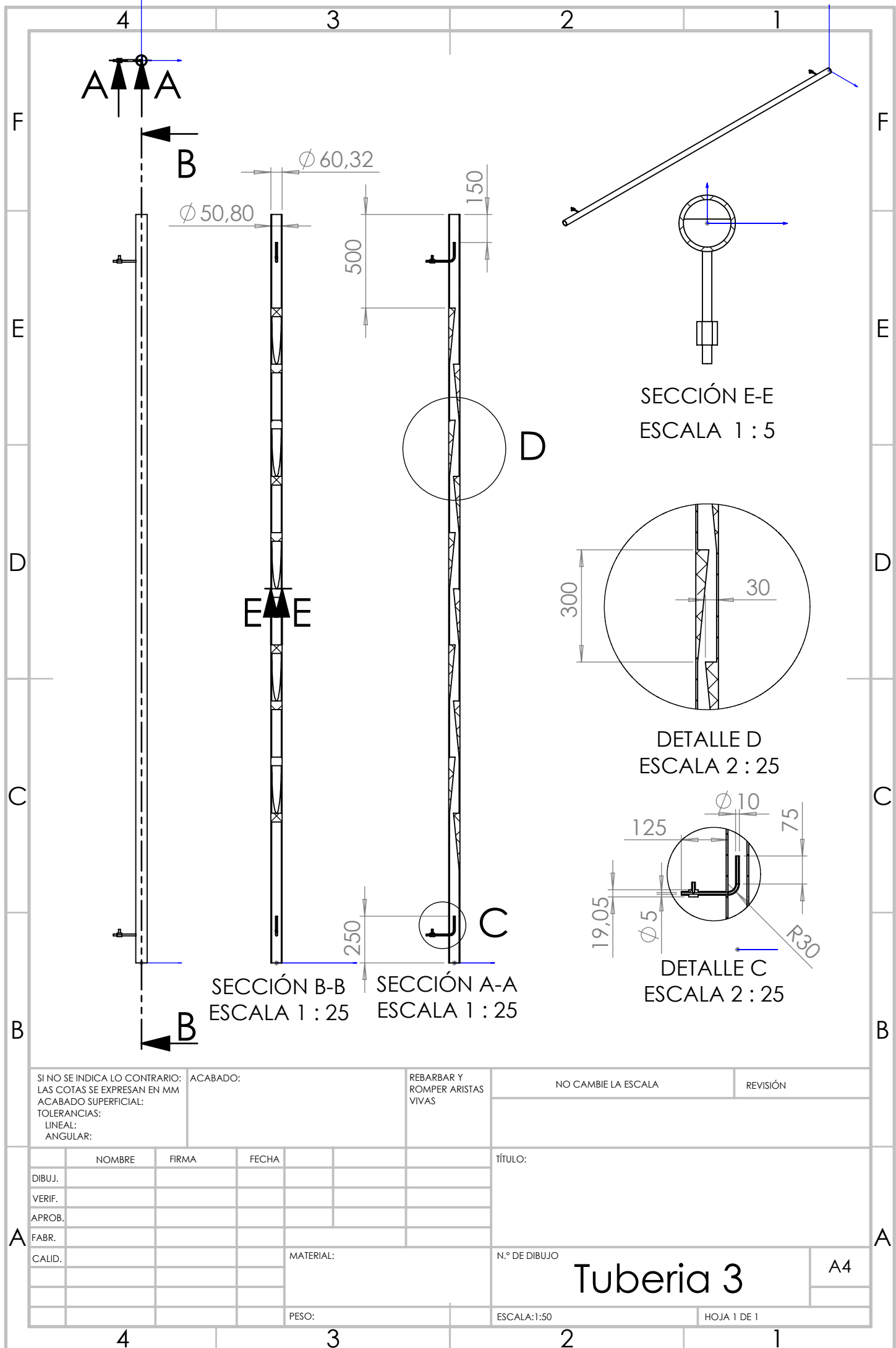
N.º DE DIBUJO

ESCALA:1:50

HOJA 1 DE 1

Tuberia 2

A4



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				

MATERIAL:

PESO:

TÍTULO:

N.º DE DIBUJO

ESCALA:1:50

HOJA 1 DE 1

Tuberia 3

A4

TUBERIA SIN OBSTRUCCIONES (CASO 1)

Este término Tenemos una tubería de PVC horizontal con un diámetro de 2 pulgadas y una longitud de 4 metros.

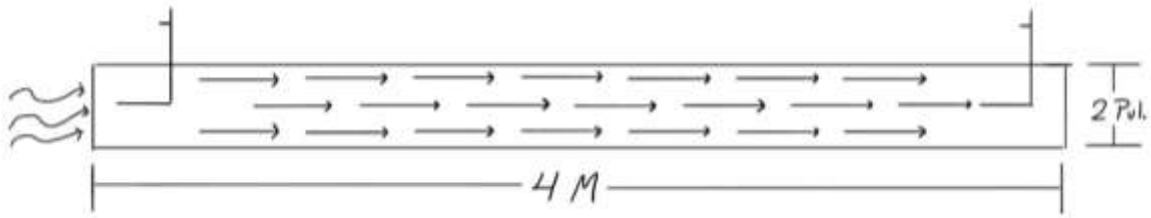


FIGURA 6: Tubo sin obstrucciones (Caso 1)

En el cual con ayuda de una secadora de cabello se le introduce aire a la tubería de PVC y utilizando el tubo de Pitot calculamos la presión, velocidad y temperatura en los puntos de entrada y salida.

Realizando los siguientes procedimientos experimentales tenemos los siguientes datos recabados	
Datos de entrada	Datos de salida
Velocidad: 17.5 Km/h	Velocidad: 15.5 Km/h
Presión: 14 kPa	Presión: 12 kPa
Temperatura: 64 °C	Temperatura: 54 °C

TABLA 3: Datos recabados del tubo sin obstrucciones (Caso 1)

Para calcular el factor de fricción en la tubería de PVC se debe de considerar si el flujo es laminar o turbulento utilizando el número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería.

Calcular coeficiente de fricción

1. Velocidad Promedio

Velocidad de entrada

$$17.5 \text{ Km/h} = 17.5 \cdot \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = 4.861 \text{ m/s}$$

Velocidad de salida

$$15.5 \text{ Km/h} = 15.5 \cdot \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = 4.306 \text{ m/s}$$

Calculamos velocidad promedio

$$V_p = \frac{V_1 \cdot V_2}{2} = \frac{4.861 \text{ m/s} + 4.306 \text{ m/s}}{2} = 4.58 \text{ m/s}$$

2. Rugosidad Absoluta

Material	E[mm]
Plástico PVC y PE	0.0015
Fierro fundido dúctil	0.5
Acero industrial	0.046
Fierro galvanizado	0.13
Mat con recubrimiento bituminoso	0.0015
Fierro fundido nuevo	0.25
Concreto liso y asbesto cemento	0.25

Materia: PVC

Rugosidad absoluta

$$\epsilon \approx 0.0015 \text{ mm}$$

Esta tabla normalmente las podemos encontrar de los catálogos de los fabricantes de tuberías.

3. Rugosidad Relativa

Diámetro del tubo

$$0.0508 \text{ m} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1.0 \text{ m}} = 50.8 \text{ mm}$$

Rugosidad absoluta

$$\epsilon \approx 0.0015 \text{ mm}$$

Calculamos la rugosidad relativa

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0.0015 \text{ mm}}{50.8 \text{ mm}} = 0.0000295 \text{ mm}$$

4. Viscosidad Cinemática

Temperatura de entrada

$$K = 64^\circ\text{C} + 273 = 337 \text{ K}$$

Temperatura de salida

$$K = 54^\circ\text{C} + 273 = 327 \text{ K}$$

Temperatura promedio

$$T_p = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{337 \text{ K} + 327 \text{ K}}{2} = 332 \text{ K}$$

$$^\circ\text{C} = 332 \text{ K} - 273 = 59^\circ\text{C}$$

Calculamos la viscosidad cinemática

Utilizaremos los datos de referencia de tablas de propiedades del aire a temperaturas más cercanas.

Temperatura	Viscosidad Cinemática
50	$1.794 \cdot 10^{-5}$
60	$1.886 \cdot 10^{-5}$

TABLA 4: Datos de temperatura y viscosidad cinemática del tubo sin obstrucciones (Caso 1)

La fórmula de la interpolación lineal es la siguiente:

$$v_{59} = v_{50} + \left(\frac{59 - 50}{60 - 50} \right) \cdot (v_{60} - v_{50})$$

Sustituimos los valores:

$$v_{59} = 1.794 \cdot 10^{-5} + \left(\frac{9}{10} \right) \cdot (1.886 \cdot 10^{-5} - 1.794 \cdot 10^{-5})$$

$$v_{59} = 1.794 \cdot 10^{-5} + 0.9 \cdot (0.092 \cdot 10^{-5})$$

$$v_{59} = 1.794 \cdot 10^{-5} + 0.0828 \cdot 10^{-5}$$

$$v_{59} = 1.8768 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} = \mathbf{1.9 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}$$

5. Numero de Reynolds (Re)

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu}$$

$$Re = \frac{4.58 \text{ m/s} \cdot 0.0508 \text{ m}}{1.9 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} \approx \mathbf{12.240}$$

(flujo turbulento, $Re > 4,000$)

Calcular el factor de fricción (f)

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{0.0000295}{3.7} + \frac{5.74}{12,240^{0.9}} \right) \right]^2} \approx 0.026$$

$$\mathbf{f \approx 0.026}$$

Verificación con pérdidas de presión

Aplicamos la ecuación de energía generalizada.

$$P_1 - P_2 = \Delta P_{fricción} + \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) + \rho g (z_2 - z_1)$$

Como la tubería es horizontal no tomamos en cuenta $\rho g (z_2 - z_1)$

1. Diferencia de presión medida

$$\Delta P = 14,000 - 12,000 = 2,000$$

2. Presión promedio

$$P_p = \frac{14,000 + 12,000}{2} = 13,000$$

3. Constante del aire (R): 287 J/Kg*K

$$\rho = \frac{P_{avg}}{R \cdot T_{avg}} = \frac{13,000}{287 \cdot 332} \approx 0.136 \text{ Kg/m}^3$$

4. Terminó cinético

$$\frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) = 0.5 \cdot 0.136 \cdot (4.306^2 - 4.861^2) \approx -0.44 \text{ Pa}$$

5. Pérdidas por fricción

$$\Delta P_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v_{avg}^2}{2} = 0.020 \cdot \frac{4}{0.0508} \cdot \frac{0.136 \cdot 4.85^2}{2} \approx 0.61 \text{ Pa}$$

Calculando el Número de Prandtl (Pr)

Utilizaremos los datos de referencia de tablas de propiedades del aire a temperaturas más cercanas.

Temperatura	Número de Prandtl
50	0.7228
60	0.7202

TABLA 5: Datos de temperatura y número de Prandtl del tubo sin obstrucciones (Caso 1)

La fórmula de la interpolación lineal es la siguiente:

$$Pr_{59} = Pr_{50} + \left(\frac{59 - 50}{60 - 50} \right) \cdot (Pr_{60} - Pr_{50})$$

Sustituimos los valores:

$$Pr_{59} = 0.7228 + \left(\frac{9}{10} \right) \cdot (0.7202 - 0.7228)$$

$$Pr_{59} = 0.7228 + 0.9 \cdot (-0.0026)$$

$$Pr_{59} = 0.7228 - 0.00234$$

$$\mathbf{Pr_{59} = 0.7205}$$

Calculando el Número de Nusselt (Nu)

Correlación de Dittus - Boelter

Para calentamiento, $n = 0.4$:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

Para $Re^{0.8}$:

$$\log_{10}(12240) \approx 4.0878$$

$$0.8 \times 4.0878 \approx 3.27024$$

$$10^{3.27024} \approx 1862.5$$

Para $Pr^{0.4}$:

$$Pr^{0.4} = 0.7205^{0.4}$$

$$\ln(0.7205) \approx -0.3278$$

$$0.4 \times (-0.3278) \approx -0.13112$$

$$e^{-0.13112} \approx 0.877$$

Multiplicamos:

$$Nu = 0.023 \times 1862.5 \times 0.877$$

$$0.023 \times 1862.5 \approx 42.8375$$

$$42.8375 \times 0.877 \approx 37.56$$

Resultado:

$$\mathbf{Nu \approx 37.6}$$

TUBERIA PVC SIN OBSTRUCCIONES (CASO 2)

Este término Tenemos una tubería de PVC horizontal con un diámetro de 2 pulgadas y una longitud de 4 metros.

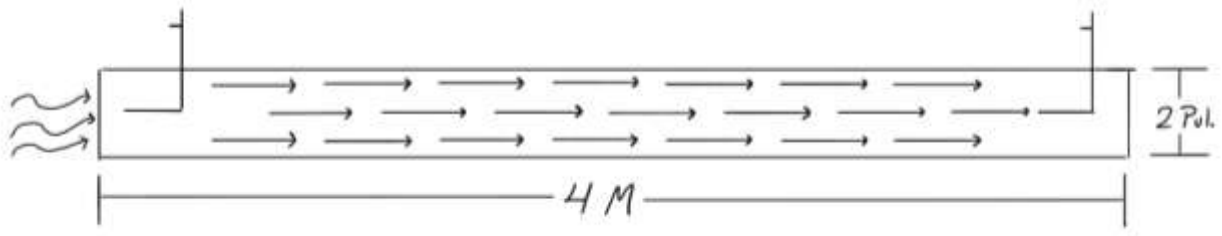


FIGURA 7: Tubo sin obstrucciones (Caso 2)

En el cual con ayuda de una secadora de cabello se le introduce aire a la tubería de PVC y utilizando el tubo de Pitot calculamos la presión, velocidad y temperatura en los puntos de entrada y salida.

Realizando los siguientes procedimientos experimentales tenemos los siguientes datos recabados	
Datos de entrada	Datos de salida
Velocidad: 28 Km/h	Velocidad: 24.5 Km/h
Presión: 36 kPa	Presión: 28 kPa
Temperatura: 73 °C	Temperatura: 60 °C

TABLA 6: Datos recabados del tubo sin obstrucciones (Caso 2)

Para calcular el factor de fricción en la tubería de PVC se debe de considerar si el flujo es laminar o turbulento utilizando el número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería.

Calcular coeficiente de fricción

1. Velocidad Promedio

Velocidad de entrada

$$28 \text{ Km/h} = 28 \cdot \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = 7.778 \text{ m/s}$$

Velocidad de salida

$$24.5 \text{ Km/h} = 24.5 \cdot \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = 6.806 \text{ m/s}$$

Calculamos velocidad promedio

$$V_p = \frac{V_1 + V_2}{2} = \frac{7.778 \text{ m/s} + 6.806 \text{ m/s}}{2} = 7.292 \text{ m/s}$$

2. Rugosidad Absoluta

Material	E[mm]
Plástico PVC y PE	0.0015
Fierro fundido dúctil	0.5
Acero industrial	0.046
Fierro galvanizado	0.13
Mat con recubrimiento bituminoso	0.0015
Fierro fundido nuevo	0.25
Concreto liso y asbesto cemento	0.25

Materia: PVC

Rugosidad absoluta

$$\epsilon \approx 0.0015 \text{ mm}$$

Esta tabla normalmente las podemos encontrar de los catálogos de los fabricantes de tuberías.

Rugosidad Relativa

Diámetro del tubo

$$0.0508 \text{ m} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1.0 \text{ m}} = 50.8 \text{ mm}$$

Rugosidad absoluta

$$\epsilon \approx 0.0015 \text{ mm}$$

Calculamos la rugosidad relativa

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0.0015 \text{ mm}}{50.8 \text{ mm}} = 0.0000295 \text{ mm}$$

3. Viscosidad Cinemática

Temperatura de entrada

$$K = 73^{\circ}\text{C} + 273 = 346 \text{ K}$$

Temperatura de salida

$$K = 60^{\circ}\text{C} + 273 = 333 \text{ K}$$

Temperatura promedio

$$T_p = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{346 \text{ K} + 333 \text{ K}}{2} = 339.5 \text{ K}$$

$$^{\circ}\text{C} = 339.5 \text{ K} - 273 = 66.5^{\circ}\text{C}$$

Calculamos la viscosidad cinemática

Utilizaremos los datos de referencia de tablas de propiedades del aire a temperaturas más cercanas.

Temperatura	Viscosidad Cinemática
60	$1.886 \cdot 10^{-5}$
70	$1.992 \cdot 10^{-5}$

TABLA 7: Datos de temperatura y viscosidad cinemática del tubo sin obstrucciones (Caso 2)

La fórmula de la interpolación lineal es la siguiente:

$$v_{66.5} = v_{60} + \left(\frac{66.5 - 60}{70 - 60} \right) \cdot (v_{70} - v_{60})$$

Sustituimos los valores:

$$v_{66.5} = 1.886 \cdot 10^{-5} + \left(\frac{6.5}{10} \right) \cdot (1.992 \cdot 10^{-5} - 1.886 \cdot 10^{-5})$$

$$v_{66.5} = 1.886 \cdot 10^{-5} + 0.65 \cdot (0.106 \cdot 10^{-5})$$

$$v_{66.5} = 1.886 \cdot 10^{-5} + 0.0689 \cdot 10^{-5}$$

$$v_{66.5} = 1.9549 \cdot 10^{-5} \text{ m}^s/\text{s} = \mathbf{1.96 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}$$

4. Numero de Reynolds (Re)

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu}$$

$$Re = \frac{7.292 \text{ m/s} \cdot 0.0508 \text{ m}}{1.96 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} \approx \mathbf{18,900}$$

(flujo turbulento, $Re > 4,000$)

Calcular el factor de fricción (f)

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{0.0000295}{3.7} + \frac{5.74}{18,900^{0.9}} \right) \right]^2} \approx 0.020$$

$$\mathbf{f \approx 0.020}$$

Verificación con pérdidas de presión

Aplicamos la ecuación de energía generalizada.

$$P_1 - P_2 = \Delta P_{fricción} + \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) + \rho g (z_2 - z_1)$$

Como la tubería es horizontal no tomamos en cuenta $\rho g (z_2 - z_1)$

1. Diferencia de presión medida

$$\Delta P = 36,000 - 28,000 = 8,000$$

2. Presión promedio

$$P_p = \frac{36,000 + 28,000}{2} = 32,000$$

3. Constante del aire (R): 287 J/Kg*K

$$\rho = \frac{P_{avg}}{R \cdot T_{avg}} = \frac{32,000}{287 \cdot 339.5} \approx 0.328 \text{ Kg/m}^3$$

4. Terminio cinético

$$\frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) = 0.5 \cdot 0.328 \cdot (6.806^2 - 7.778^2) \approx -1.55 \text{ Pa}$$

5. Perdidas por fricción

$$\Delta P_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v_{avg}^2}{2} = 0.020 \cdot \frac{4}{0.0508} \cdot \frac{0.328 \cdot 7.292^2}{2} \approx 13.73 \text{ Pa}$$

Calculando el Numero de Prandtl (Pr)

Utilizaremos los datos de referencia de tablas de propiedades del aire a temperaturas más cercanas.

Temperatura	Número de Prandtl
60	0.7202
70	0.7177

TABLA 8: Datos de temperatura y número de Prandtl del tubo sin obstrucciones (Caso 2)

La fórmula de la interpolación lineal es la siguiente:

$$Pr_{66.5} = Pr_{60} + \left(\frac{66.5 - 60}{70 - 60} \right) \cdot (Pr_{70} - Pr_{60})$$

Sustituimos los valores:

$$Pr_{66.5} = 0.7202 + \left(\frac{9}{10} \right) \cdot (0.7177 - 0.7202)$$

$$Pr_{66.5} = 0.7202 + 0.65 \cdot (-0.0025)$$

$$Pr_{66.5} = 0.7202 - 0.001625$$

$$\mathbf{Pr_{66.5} = 0.7186}$$

Calculando el Número de Nusselt (Nu)

Correlación de Dittus - Boelter

Para calentamiento, $n = 0.4$:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

Para $Re^{0.8}$:

$$\log_{10}(18900) \approx 4.27646$$

$$0.8 \times 4.27646 \approx 3.42117$$

$$10^{3.42117} \approx 2637.2$$

Para $Pr^{0.4}$:

$$Pr^{0.4} = 0.7186^{0.4}$$

$$\ln(0.7186) \approx -0.33045$$

$$0.4 \times (-0.33045) \approx -0.13218$$

$$e^{-0.13218} \approx 0.8762$$

Multiplicamos:

$$Nu = 0.023 \times 2637.2 \times 0.8762$$

$$0.023 \times 2637.2 \approx 60.6556$$

$$60.6556 \times 0.8762 \approx 53.14$$

Resultado:

$$\mathbf{Nu \approx 53.1}$$

TUBERIA CON OBSTRUCCIONES DE CRUZ (CASO 1)

Este término tenemos una tubería de PVC horizontal con un diámetro de 2 pulgadas y una longitud de 4 metros el cual tiene obstrucciones de cruz.

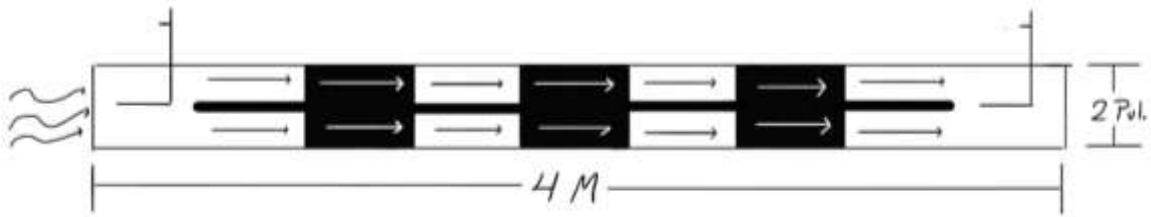


FIGURA 8: Tubo con obstrucciones de cruz (Caso 1)

En el cual con ayuda de una secadora de cabello se le introduce aire a la tubería de PVC y utilizando el tubo de Pitot calculamos la presión, velocidad y temperatura en los puntos de entrada y salida.

Realizando los siguientes procedimientos experimentales tenemos los siguientes datos recabados	
Datos de entrada	Datos de salida
Velocidad: 18 Km/h	Velocidad: 11.7 Km/h
Presión: 15 kPa	Presión: 12 kPa
Temperatura: 65 °C	Temperatura: 42 °C

TABLA 9: Datos recabados del tubo con obstrucciones de cruz (Caso 1)

Para calcular el factor de fricción en la tubería de PVC se debe de considerar si el flujo es laminar o turbulento utilizando el número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería.

Calcular coeficiente de fricción

1. Velocidad Promedio

Velocidad de entrada

$$18 \text{ Km/h} = 18 \cdot \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = 5 \text{ m/s}$$

Velocidad de salida

$$11.7 \text{ Km/h} = 11.7 \cdot \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = 3.25 \text{ m/s}$$

Calculamos velocidad promedio

$$V_p = \frac{V_1 \cdot V_2}{2} = \frac{5 \text{ m/s} + 3.25 \text{ m/s}}{2} = 6.625 \text{ m/s}$$

2. Rugosidad Absoluta

Material	E[mm]
Plástico PVC y PE	0.0015
Fierro fundido dúctil	0.5
Acero industrial	0.046
Fierro galvanizado	0.13
Mat con recubrimiento bituminoso	0.0015
Fierro fundido nuevo	0.25
Concreto liso y asbesto cemento	0.25

Materia: PVC

Rugosidad absoluta

$$\epsilon \approx 0.0015 \text{ mm}$$

Esta tabla normalmente las podemos encontrar de los catálogos de los fabricantes de tuberías

3. Rugosidad Relativa

Diámetro del tubo

$$0.0508 \text{ m} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1.0 \text{ m}} = 50.8 \text{ mm}$$

Rugosidad absoluta

$$\epsilon \approx 0.0015 \text{ mm}$$

Calculamos la rugosidad relativa

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0.0015 \text{ mm}}{50.8 \text{ mm}} = 0.0000295$$

4. Viscosidad Cinemática

Temperatura de entrada

$$K = 65^{\circ}\text{C} + 273 = 338 \text{ K}$$

Temperatura de salida

$$K = 42^{\circ}\text{C} + 273 = 315 \text{ K}$$

Temperatura promedio

$$T_p = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{338 \text{ K} + 315 \text{ K}}{2} = 326.5 \text{ K}$$

$$^{\circ}\text{C} = 326.5 \text{ K} - 273 = 53.5^{\circ}\text{C}$$

Calculamos la viscosidad cinemática

Utilizaremos los datos de referencia de tablas de propiedades del aire a temperaturas más cercanas.

Temperatura	Viscosidad Cinemática
50	$1.794 \cdot 10^{-5}$
60	$1.886 \cdot 10^{-5}$

TABLA 10: Datos de temperatura y viscosidad cinemática del tubo con obstrucciones de cruz (Caso 1)

La fórmula de la interpolación lineal es la siguiente:

$$v_{53.5} = v_{60} + \left(\frac{53.5 - 60}{60 - 50} \right) \cdot (v_{60} - v_{50})$$

Sustituimos los valores:

$$v_{53.5} = 1.794 \cdot 10^{-5} + \left(\frac{3.5}{10} \right) \cdot (1.886 \cdot 10^{-5} - 1.794 \cdot 10^{-5})$$

$$v_{53.5} = 1.794 \cdot 10^{-5} + 0.35 \cdot (0.092 \cdot 10^{-5})$$

$$v_{53.5} = 1.794 \cdot 10^{-5} + 0.032 \cdot 10^{-5}$$

$$v_{53} = 1.826 \cdot 10^{-5} \text{ m}^s/\text{s} = \mathbf{1.83 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}$$

5. Numero de Reynolds (Re)

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu}$$

$$Re = \frac{6.625 \text{ m} \cdot 0.0508 \text{ m}}{1.83 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} \approx \mathbf{18,390}$$

(flujo turbulento, $Re > 4,000$)

Calcular el factor de fricción (f)

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{0.0000295}{3.7} + \frac{5.74}{18,390^{0.9}} \right) \right]^2} \approx 0.021$$

$$\mathbf{f \approx 0.021}$$

Verificación con pérdidas de presión

Aplicamos la ecuación de energía generalizada.

$$P_1 - P_2 = \Delta P_{fricción} + \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2) + \rho g(z_2 - z_1)$$

Como la tubería es horizontal no tomamos en cuenta $\rho g(z_2 - z_1)$

1. Diferencia de presión medida

$$\Delta P = 15,000 - 12,000 = 3,000$$

2. presión promedio

$$P_p = \frac{14,000 + 12,000}{2} = 13,500$$

3. Constante del aire (R): 287 J/Kg*K

$$\rho = \frac{P_{avg}}{R \cdot T_{avg}} = \frac{13,500}{287 \cdot 326.5} \approx 0.144 \text{ Kg/m}^3$$

4. Terminio cinético

$$\frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2) = 0.5 \cdot 0.144 \cdot (3.25^2 - 5^2) \approx 0.11 \text{ Pa}$$

5. Perdidas por fricción

$$\Delta P_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v_{avg}^2}{2} = 0.021 \cdot \frac{4}{0.0508} \cdot \frac{0.144 \cdot 6.625^2}{2} \approx 5.22 \text{ Pa}$$

Calculando el Numero de Prandtl (Pr)

Utilizaremos los datos de referencia de tablas de propiedades del aire a temperaturas más cercanas

Temperatura	Número de Prandtl
50	0.7228
60	0.7202

TABLA 11: Datos de temperatura y número de Prandtl del tubo con obstrucciones de cruz (Caso 1)

La fórmula de la interpolación lineal es la siguiente:

$$Pr_{53.5} = Pr_{50} + \left(\frac{53.5 - 50}{60 - 50} \right) \cdot (Pr_{60} - Pr_{50})$$

Sustituimos los valores:

$$Pr_{53.5} = 0.7228 + \left(\frac{3.5}{10} \right) \cdot (0.7202 - 0.7228)$$

$$Pr_{53.5} = 0.7228 + 0.35 \cdot (-0.0026)$$

$$Pr_{53.5} = 0.7228 - 0.00091$$

$$\mathbf{Pr_{53.5} = 0.7218}$$

Calculando el Número de Nusselt (Nu)

Correlación de Dittus - Boelter

Para calentamiento, $n = 0.4$:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

Para $Re^{0.8}$:

$$\log_{10}(18390) \approx 4.26455$$

$$0.8 \times 4.26455 \approx 3.41164$$

$$10^{3.41164} \approx 2580.6$$

Para $Pr^{0.4}$:

$$Pr^{0.4} = 0.7218^{0.4}$$

$$\ln(0.7218) \approx -0.32595$$

$$0.4 \times (-0.32595) \approx -0.13038$$

$$e^{-0.13038} \approx 0.8778$$

Multiplicamos:

$$Nu = 0.023 \times 2580.6 \times 0.8778$$

$$0.023 \times 2580.6 \approx 59.3538$$

$$59.3538 \times 0.8778 \approx 52.10$$

Resultado:

$$\mathbf{Nu \approx 52.10}$$

TUBERIA CON OBSTRUCCIONES DE CRUZ (CASO 2)

Este término tenemos una tubería de PVC horizontal con un diámetro de 2 pulgadas y una longitud de 4 metros el cual tiene obstrucciones de cruz.

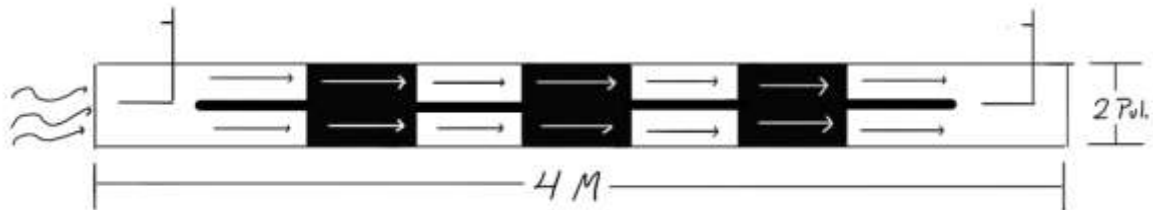


FIGURA 9: Tubo con obstrucciones de cruz (Caso 2)

En el cual con ayuda de una secadora de cabello se le introduce aire a la tubería de PVC y utilizando el tubo de Pitot calculamos la presión, velocidad y temperatura en los puntos de entrada y salida.

Realizando los siguientes procedimientos experimentales tenemos los siguientes datos recabados	
Datos de entrada	Datos de salida
Velocidad: 29 Km/h	Velocidad: 20.5 Km/h
Presión: 38 kPa	Presión: 28 kPa
Temperatura: 78 °C	Temperatura: 56 °C

TABLA 12: Datos recabados del tubo con obstrucciones de cruz (Caso 2)

Para calcular el factor de fricción en la tubería de PVC se debe de considerar si el flujo es laminar o turbulento utilizando el número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería.

Calcular coeficiente de fricción

1. Velocidad Promedio

Velocidad de entrada

$$29 \text{ Km/h} = 29 \cdot \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = 8.055 \text{ m/s}$$

Velocidad de salida

$$20.5 \text{ Km/h} = 20.5 \cdot \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = 5.694 \text{ m/s}$$

Calculamos velocidad promedio

$$V_p = \frac{V_1 + V_2}{2} = \frac{8.055 \text{ m/s} + 5.694 \text{ m/s}}{2} = 6.874 \text{ m/s}$$

2. Rugosidad Absoluta

Material	E[mm]
Plástico PVC y PE	0.0015
Fierro fundido dúctil	0.5
Acero industrial	0.046
Fierro galvanizado	0.13
Mat con recubrimiento bituminoso	0.0015
Fierro fundido nuevo	0.25
Concreto liso y asbesto cemento	0.25

Materia: PVC

Rugosidad absoluta

$$\epsilon \approx 0.0015 \text{ mm}$$

Esta tabla normalmente las podemos encontrar de los catálogos de los fabricantes de tuberías

3. Rugosidad Relativa

Diámetro del tubo

$$0.0508 \text{ m} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1.0 \text{ m}} = 50.8 \text{ mm}$$

Rugosidad absoluta

$$\epsilon \approx 0.0015 \text{ mm}$$

Calculamos la rugosidad relativa

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0.0015 \text{ mm}}{50.8 \text{ mm}} = 0.0000295 \text{ mm}$$

4. Viscosidad Cinemática

Temperatura de entrada

$$K = 78^{\circ}\text{C} + 273 = 351 \text{ K}$$

Temperatura de salida

$$K = 56^{\circ}\text{C} + 273 = 329 \text{ K}$$

Temperatura promedio

$$T_p = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{351 \text{ K} + 329 \text{ K}}{2} = 340 \text{ K}$$

$$^{\circ}\text{C} = 340 \text{ K} - 273 = 67^{\circ}\text{C}$$

Calculamos la viscosidad cinemática

Utilizaremos los datos de referencia de tablas de propiedades del aire a temperaturas más cercanas.

Temperatura	Viscosidad Cinemática
60	$1.886 \cdot 10^{-5}$
70	$1.992 \cdot 10^{-5}$

TABLA 13: Datos de temperatura y viscosidad cinemática del tubo con obstrucciones de cruz (Caso 2)

La fórmula de la interpolación lineal es la siguiente:

$$v_{67} = v_{60} + \left(\frac{67 - 60}{70 - 60} \right) \cdot (v_{70} - v_{60})$$

Sustituimos los valores:

$$v_{67} = 1.886 \cdot 10^{-5} + \left(\frac{7}{10} \right) \cdot (1.992 \cdot 10^{-5} - 1.886 \cdot 10^{-5})$$

$$v_{67} = 1.886 \cdot 10^{-5} + 0.7 \cdot (0.106 \cdot 10^{-5})$$

$$v_{67} = 1.886 \cdot 10^{-5} + 0.0742 \cdot 10^{-5}$$

$$v_{67} = 1.9602 \cdot 10^{-5} \text{ m}^s/\text{s} = \mathbf{1.96 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}$$

5. Numero de Reynolds (Re)

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu}$$

$$Re = \frac{6.874 \text{ m/s} \cdot 0.0508 \text{ m}}{1.96 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} \approx \mathbf{17,816}$$

(flujo turbulento, $Re > 4,000$)

Calcular el factor de fricción (f)

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{0.0000295}{3.7} + \frac{5.74}{17,816^{0.9}} \right) \right]^2} \approx 0.020$$

$$\mathbf{f \approx 0.020}$$

Verificación con pérdidas de presión

Aplicamos la ecuación de energía generalizada.

$$P_1 - P_2 = \Delta P_{fricción} + \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) + \rho g (z_2 - z_1)$$

Como la tubería es horizontal no tomamos en cuenta $\rho g (z_2 - z_1)$

1. Diferencia de presión medida

$$\Delta P = 38,000 - 28,000 = 10,000$$

2. presión promedio

$$P_p = \frac{38,000 + 28,000}{2} = 52,000$$

3. Constante del aire (R): 287 J/Kg*K

$$\rho = \frac{P_{avg}}{R \cdot T_{avg}} = \frac{52,500}{287 \cdot 340} \approx 0.532 \text{ Kg/m}^3$$

4. Terminio cinético

$$\frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) = 0.5 \cdot 0.532 \cdot (5.694^2 - 8.055^2) \approx -8.63 \text{ Pa}$$

5. Perdidas por fricción

$$\Delta P_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v_{avg}^2}{2} = 0.020 \cdot \frac{4}{0.0508} \cdot \frac{0.532 \cdot 6.874^2}{2} \approx 19.79 \text{ Pa}$$

Calculando el Numero de Prandtl (Pr)

Utilizaremos los datos de referencia de tablas de propiedades del aire a temperaturas más cercanas.

Temperatura	Número de Prandtl
60	0.7202
70	0.7177

TABLA 14: Datos de temperatura y número de Prandtl del tubo con obstrucciones de cruz (Caso 2)

La fórmula de la interpolación lineal es la siguiente:

$$Pr_{67} = Pr_{60} + \left(\frac{67 - 60}{70 - 60} \right) \cdot (Pr_{70} - Pr_{60})$$

Sustituimos los valores:

$$Pr_{67} = 0.7202 + \left(\frac{7}{10} \right) \cdot (0.7177 - 0.7202)$$

$$Pr_{67} = 0.7202 + 0.7 \cdot (-0.0025)$$

$$Pr_{67} = 0.7202 - 0.00175$$

$$\mathbf{Pr_{67} = 0.7184}$$

Calculando el Número de Nusselt (Nu)

Correlación de Dittus - Boelter

Para calentamiento, $n = 0.4$:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

Para $Re^{0.8}$:

$$\log_{10}(17816) \approx 4.25080$$

$$0.8 \times 4.25080 \approx 3.40064$$

$$10^{3.40064} \approx 2515.2$$

Para $Pr^{0.4}$:

$$Pr^{0.4} = 0.7184^{0.4}$$

$$\ln(0.7184) \approx -0.33076$$

$$0.4 \times (-0.33076) \approx -0.13230$$

$$e^{-0.13230} \approx 0.8761$$

Multiplicamos:

$$Nu = 0.023 \times 2515.2 \times 0.8761$$

$$0.023 \times 2515.2 \approx 57.8496$$

$$57.8496 \times 0.8761 \approx 50.68$$

Resultado:

$$\mathbf{Nu \approx 50.68}$$

TUBERIA CON OBSTRUCCIONES DE RAMPA (CASO 1)

Este término Tenemos una tubería de PVC horizontal con un diámetro de 2 pulgadas y una longitud de 4 metros el cual tiene obstrucciones de rampa.

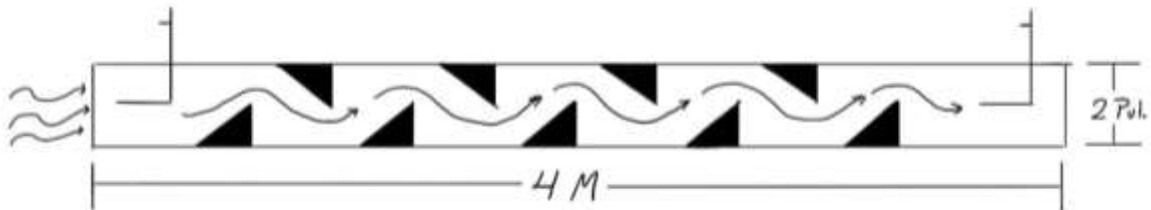


FIGURA 10: Tubo con obstrucciones de Rampa (Caso 1)

En el cual con ayuda de una secadora de cabello se le introduce aire a la tubería de PVC y utilizando el tubo de Pitot calculamos la presión, velocidad y temperatura en los puntos de entrada y salida.

Realizando los siguientes procedimientos experimentales tenemos los siguientes datos recabados	
Datos de entrada	Datos de salida
Velocidad: 17 Km/h	Velocidad: 14 Km/h
Presión: 22 kPa	Presión: 11 kPa
Temperatura: 64 °C	Temperatura: 44 °C

TABLA 15: Datos recabados del tubo con obstrucciones de rampa (Caso 1)

Para calcular el factor de fricción en la tubería de PVC se debe de considerar si el flujo es laminar o turbulento utilizando el número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería.

Calcular coeficiente de fricción

1. Velocidad Promedio

Velocidad de entrada

$$17 \text{ Km/h} = 17 \cdot \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = 4.72 \text{ m/s}$$

Velocidad de salida

$$14 \text{ Km/h} = 14 \cdot \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = 3.88 \text{ m/s}$$

Calculamos velocidad promedio

$$V_p = \frac{V_1 \cdot V_2}{2} = \frac{4.72 \text{ m/s} + 3.88 \text{ m/s}}{2} = 4.3 \text{ m/s}$$

2. Rugosidad Absoluta

Material	E[mm]
Plástico PVC y PE	0.0015
Fierro fundido dúctil	0.5
Acero industrial	0.046
Fierro galvanizado	0.13
Mat con recubrimiento bituminoso	0.0015
Fierro fundido nuevo	0.25
Concreto liso y asbesto cemento	0.25

Materia: PVC

Rugosidad absoluta

$$\epsilon \approx 0.0015 \text{ mm}$$

Esta tabla normalmente las podemos encontrar de los catálogos de los fabricantes de tuberías

3. Rugosidad Relativa

Diámetro del tubo

$$0.0508 \text{ m} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1.0 \text{ m}} = 50.8 \text{ mm}$$

Rugosidad absoluta

$$\epsilon \approx 0.0015 \text{ mm}$$

Calculamos la rugosidad relativa

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0.0015 \text{ mm}}{50.8 \text{ mm}} = 0.0000295$$

4. Viscosidad Cinemática

Temperatura de entrada

$$K = 64^{\circ}\text{C} + 273 = 337 \text{ K}$$

Temperatura de salida

$$K = 44^{\circ}\text{C} + 273 = 317 \text{ K}$$

Temperatura promedio

$$T_p = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{337 \text{ K} + 317 \text{ K}}{2} = 327 \text{ K}$$

$$^{\circ}\text{C} = 327 \text{ K} - 273 = 54^{\circ}\text{C}$$

Calculamos la viscosidad cinemática

Utilizaremos los datos de referencia de tablas de propiedades del aire a temperaturas más cercanas.

Temperatura	Viscosidad Cinemática
50	$1.794 \cdot 10^{-5}$
60	$1886 \cdot 10^{-5}$

TABLA 16: Datos de temperatura y viscosidad cinemática del tubo con obstrucciones de rampa (Caso 1)

La fórmula de la interpolación lineal es la siguiente:

$$v_{54} = v_{50} + \left(\frac{54 - 50}{60 - 50} \right) \cdot (v_{60} - v_{50})$$

Sustituimos los valores:

$$v_{54} = 1.794 \cdot 10^{-5} + \left(\frac{4}{10} \right) \cdot (1.886 \cdot 10^{-5} - 1.794 \cdot 10^{-5})$$

$$v_{54} = 1.794 \cdot 10^{-5} + 0.4 \cdot (0.092 \cdot 10^{-5})$$

$$v_{54} = 1.794 \cdot 10^{-5} + 0.0368 \cdot 10^{-5}$$

$$v_{54} = \mathbf{1.886 \cdot 10^{-5} \, m^s/s}$$

5. Numero de Reynolds (Re)

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu}$$

$$Re = \frac{4.3 \, m/s \cdot 0.0508 \, m}{1.96 \cdot 10^{-5} \, m^2/s} \approx \mathbf{11,582}$$

(flujo turbulento, $Re > 4,000$)

Calcular el factor de fricción (f)

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{0.0000295}{3.7} + \frac{5.74}{11,582^{0.9}} \right) \right]^2} \approx 0.022$$

$$\mathbf{f \approx 0.022}$$

Verificación con pérdidas de presión

Aplicamos la ecuación de energía generalizada.

$$P_1 - P_2 = \Delta P_{fricción} + \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) + \rho g (z_2 - z_1)$$

Como la tubería es horizontal no tomamos en cuenta $\rho g (z_2 - z_1)$

1. Diferencia de presión medida

$$\Delta P = 22,000 - 11,000 = 11,000$$

2. presión promedio

$$P_p = \frac{22,000 + 11,000}{2} = 16,500$$

3. Constante del aire (R): 287 J/Kg*K

$$\rho = \frac{P_{avg}}{R \cdot T_{avg}} = \frac{16,500}{287 \cdot 327} \approx 0.175 \text{ Kg/m}^3$$

4. Terminó cinético

$$\frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) = 0.5 \cdot 0.175 \cdot (3.88^2 - 4.72^2) \approx -0.63 \text{ Pa}$$

5. Pérdidas por fricción

$$\Delta P_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v_{avg}^2}{2} = 0.022 \cdot \frac{4}{0.0508} \cdot \frac{0.175 \cdot 4.3^2}{2} \approx 3.35 \text{ Pa}$$

Calculando el Numero de Prandtl (Pr)

Utilizaremos los datos de referencia de tablas de propiedades del aire a temperaturas más cercanas.

Temperatura	Número de Prandtl
50	0.7228
60	0.7202

TABLA 17: Datos de temperatura y numero de Prandtl del tubo con obstrucciones de rampa (Caso 1)

La fórmula de la interpolación lineal es la siguiente:

$$Pr_{54} = Pr_{50} + \left(\frac{54 - 50}{60 - 50} \right) \cdot (Pr_{60} - Pr_{50})$$

Sustituimos los valores:

$$Pr_{54} = 0.7228 + \left(\frac{4}{10} \right) \cdot (0.7202 - 0.7228)$$

$$Pr_{54} = 0.7228 + 0.4 \cdot (-0.0026)$$

$$Pr_{54} = 0.7228 - 0.00104$$

$$\mathbf{Pr_{54} = 0.7218}$$

Calculando el Número de Nusselt (Nu)

Correlación de Dittus - Boelter

Para calentamiento, $n = 0.4$:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

Para $Re^{0.8}$:

$$\log_{10}(11582) \approx 4.06378$$

$$0.8 \times 4.06378 \approx 3.25102$$

$$10^{3.25102} \approx 1782.5$$

Para $Pr^{0.4}$:

$$Pr^{0.4} = 0.7218^{0.4}$$

$$\ln(0.7218) \approx -0.32595$$

$$0.4 \times (-0.32595) \approx -0.13038$$

$$e^{-0.13038} \approx 0.8778$$

Multiplicamos:

$$Nu = 0.023 \times 1782.5 \times 0.8778$$

$$0.023 \times 1782.5 \approx 40.9975$$

$$40.9975 \times 0.8778 \approx 35.98$$

Resultado:

$$Nu \approx 36.0$$

TUBERIA CON OBSTRUCCIONES DE RAMPA (CASO 2)

Este término Tenemos una tubería de PVC horizontal con un diámetro de 2 pulgadas y una longitud de 4 metros el cual tiene obstrucciones de rampa.

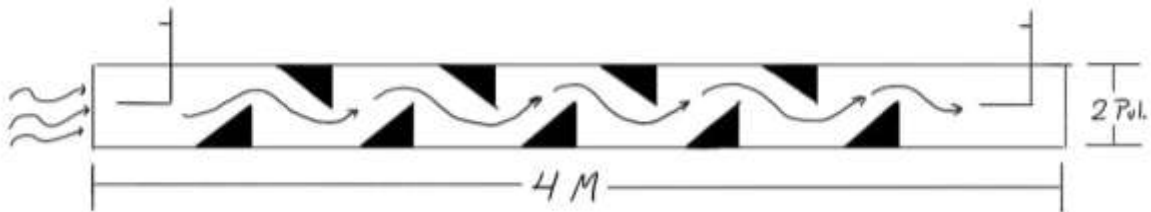


FIGURA 11: Tubo con obstrucciones de Rampa (Caso 2)

En el cual con ayuda de una secadora de cabello se le introduce aire a la tubería de PVC y utilizando el tubo de Pitot calculamos la presión, velocidad y temperatura en los puntos de entrada y salida.

Realizando los siguientes procedimientos experimentales tenemos los siguientes datos recabados	
Datos de entrada	Datos de salida
Velocidad: 23 Km/h	Velocidad: 15 Km/h
Presión: 42 kPa	Presión: 31 kPa
Temperatura: 76 °C	Temperatura: 52 °C

TABLA 18: Datos recabados del tubo con obstrucciones de rampa (Caso 2)

Para calcular el factor de fricción en la tubería de PVC se debe de considerar si el flujo es laminar o turbulento utilizando el número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería.

Calcular coeficiente de fricción

1. Velocidad Promedio

Velocidad de entrada

$$23 \text{ Km/h} = 23 \cdot \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = 6.38 \text{ m/s}$$

Velocidad de salida

$$15 \text{ Km/h} = 15 \cdot \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = 4.16 \text{ m/s}$$

Calculamos velocidad promedio

$$V_p = \frac{V_1 + V_2}{2} = \frac{6.38 \text{ m/s} + 4.16 \text{ m/s}}{2} = 5.27 \text{ m/s}$$

2. Rugosidad Absoluta

Material	E[mm]
Plástico PVC y PE	0.0015
Fierro fundido dúctil	0.5
Acero industrial	0.046
Fierro galvanizado	0.13
Mat con recubrimiento bituminoso	0.0015
Fierro fundido nuevo	0.25
Concreto liso y asbesto cemento	0.25

Materia: PVC

Rugosidad absoluta

$$\epsilon \approx 0.0015 \text{ mm}$$

Esta tabla normalmente las podemos encontrar de los catálogos de los fabricantes de tuberías

3. Rugosidad Relativa

Diámetro del tubo

$$0.0508 \text{ m} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1.0 \text{ m}} = 50.8 \text{ mm}$$

Rugosidad absoluta

$$\epsilon \approx 0.0015 \text{ mm}$$

Calculamos la rugosidad relativa

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0.0015 \text{ mm}}{50.8 \text{ mm}} = 0.0000295 \text{ mm}$$

4. Viscosidad Cinemática

Temperatura de entrada

$$K = 76^{\circ}\text{C} + 273 = 349 \text{ K}$$

Temperatura de salida

$$K = 52^{\circ}\text{C} + 273 = 325 \text{ K}$$

Temperatura promedio

$$T_p = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{349 \text{ K} + 325 \text{ K}}{2} = 340 \text{ K}$$

$$^{\circ}\text{C} = 337 \text{ K} - 273 = 64^{\circ}\text{C}$$

Calculamos la viscosidad cinemática

Utilizaremos los datos de referencia de tablas de propiedades del aire a temperaturas más cercanas.

Temperatura	Viscosidad Cinemática
60	$1.886 \cdot 10^{-5}$
70	$1.992 \cdot 10^{-5}$

TABLA 19: Datos de temperatura y viscosidad cinemática del tubo con obstrucciones de rampa (Caso 2)

La fórmula de la interpolación lineal es la siguiente:

$$v_{64} = v_{60} + \left(\frac{64 - 60}{70 - 60} \right) \cdot (v_{70} - v_{60})$$

Sustituimos los valores:

$$v_{64} = 1.886 \cdot 10^{-5} + \left(\frac{4}{10} \right) \cdot (1.992 \cdot 10^{-5} - 1.886 \cdot 10^{-5})$$

$$v_{64} = 1.886 \cdot 10^{-5} + 0.7 \cdot (0.106 \cdot 10^{-5})$$

$$v_{64} = 1.886 \cdot 10^{-5} + 0.0424 \cdot 10^{-5}$$

$$v_{64} = 1.9284 \cdot 10^{-5} \text{ m}^s/\text{s} = \mathbf{1.93 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}$$

5. Numero de Reynolds (Re)

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu}$$

$$Re = \frac{5.27 \text{ m/s} \cdot 0.0508 \text{ m}}{1.93 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} \approx \mathbf{13,871}$$

(flujo turbulento, $Re > 4,000$)

Calcular el factor de fricción (f)

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{0.0000295}{3.7} + \frac{5.74}{13,871^{0.9}} \right) \right]^2} \approx 0.021$$

$$\mathbf{f \approx 0.021}$$

Verificación con pérdidas de presión

Aplicamos la ecuación de energía generalizada.

$$P_1 - P_2 = \Delta P_{fricción} + \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) + \rho g (z_2 - z_1)$$

Como la tubería es horizontal no tomamos en cuenta $\rho g (z_2 - z_1)$

1. Diferencia de presión medida

$$\Delta P = 42,000 - 31,000 = 11,000$$

2. presión promedio

$$P_p = \frac{14,000 + 12,000}{2} = 36,500$$

3. Constante del aire (R): 287 J/Kg*K

$$\rho = \frac{P_{avg}}{R \cdot T_{avg}} = \frac{36,500}{287 \cdot 337} \approx 0.377 \text{ Kg/m}^3$$

4. Terminio cinético

$$\frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) = 0.5 \cdot 0.377 \cdot (4.16^2 - 6.38^2) \approx -4.41 \text{ Pa}$$

5. Perdidas por fricción

$$\Delta P_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v_{avg}^2}{2} = 0.021 \cdot \frac{4}{0.0508} \cdot \frac{0.377 \cdot 5.27^2}{2} \approx 9.64 \text{ Pa}$$

Calculando el Numero de Prandtl (Pr)

Utilizaremos los datos de referencia de tablas de propiedades del aire a temperaturas más cercanas.

Temperatura	Número de Prandtl
60	0.7202
70	0.7177

TABLA 20: Datos de temperatura y numero de Prandtl del tubo con obstrucciones de rampa (Caso 2)

La fórmula de la interpolación lineal es la siguiente:

$$Pr_{64} = Pr_{60} + \left(\frac{64 - 60}{70 - 60} \right) \cdot (Pr_{70} - Pr_{60})$$

Sustituimos los valores:

$$Pr_{64} = 0.7202 + \left(\frac{4}{10} \right) \cdot (0.7177 - 0.7202)$$

$$Pr_{64} = 0.7202 + 0.4 \cdot (-0.0025)$$

$$Pr_{64} = 0.7202 - 0.0010$$

$$\mathbf{Pr_{64} = 0.7192}$$

Calculando el Número de Nusselt (Nu)

Correlación de Dittus - Boelter

Para calentamiento, $n = 0.4$:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

Para $Re^{0.8}$:

$$\log_{10}(13871) \approx 4.14218$$

$$0.8 \times 4.14218 \approx 3.31374$$

$$10^{3.31374} \approx 2060.0$$

Para $Pr^{0.4}$:

$$Pr^{0.4} = 0.7192^{0.4}$$

$$\ln(0.7192) \approx -0.32966$$

$$0.4 \times (-0.32966) \approx -0.13186$$

$$e^{-0.13186} \approx 0.8765$$

Multiplicamos:

$$Nu = 0.023 \times 2060.0 \times 0.8765$$

$$0.023 \times 1060.0 \approx 47.3865$$

$$47.3865 \times 0.8765 \approx 41.53$$

Resultado:

$$\mathbf{Nu \approx 41.53}$$

CONCLUSIONES

El valor del factor de fricción en tubos de PVC no depende únicamente de las propiedades del material, sino también de otros parámetros fundamentales como el diámetro de la tubería, la velocidad del flujo, la viscosidad del fluido y el régimen hidráulico (laminar, transitorio o turbulento). En particular, cuando el flujo es laminar, el factor de fricción se relaciona de manera inversa con el número de Reynolds; mientras que, en régimen turbulento, la rugosidad relativa del material adquiere un papel más determinante.

Por lo tanto, el estudio del factor de fricción en tubos de PVC no solo contribuye a optimizar el diseño de redes hidráulicas, sino que también permite minimizar pérdidas energéticas, seleccionar adecuadamente bombas y equipos de impulsión, y garantizar la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas. De este modo, comprender este parámetro se convierte en un aspecto indispensable dentro de la ingeniería civil, mecánica e hidráulica moderna.

En suma, la conclusión que se desprende del análisis del factor de fricción en relación con tuberías de PVC es que este material ofrece ventajas significativas frente a alternativas metálicas o de concreto, principalmente por su baja rugosidad relativa y estabilidad en el tiempo, lo cual se traduce en menores pérdidas de carga, reducción de costos energéticos y eficiencia sostenida en sistemas hidráulicos. Estas características han permitido que el PVC se consolide como una opción prioritaria en redes de agua potable, sistemas de riego, conducciones industriales y aplicaciones ambientales. No obstante, estas ventajas deben evaluarse dentro de un marco que considere sus limitaciones mecánicas y térmicas, así como los impactos ambientales asociados a su ciclo de vida.

FUENTES DE INFORMACIÓN

Matienzo, B. (15 de octubre de 2019). *FACTOR DE FRICCION* Obtenido de:
(sites.google.com)

Calentadores de aire. Obtenido de:
(bunca.org)

FAG, R. (18 de agosto de 2017). *Ingemecanica.com*. Obtenido de:
(ingemecanica.com)

REDALYC. (28 de noviembre de 2019). *Factor de fricción en tubos PVC*. Obtenido de:
redalyc.org

FISICAS, R. (s.f.). *RENOVETEC*. (RENOVETEC. Diseño de obstrucciones para calentadores de aire.) Recuperado el 2019 de noviembre de 18, de:
renovetec.com

Zapata, M. (15 de noviembre de 2017). *Musiki*. Obtenido de:
(musiki.org.)