

02-020

CHARACTERIZATION OF THE ABSOLUTE ROUGHNESS OF THE MATERIAL AND OF THE HAZEN-WILLIAMS COEFFICIENT

Romero Sedó, Antonio Manuel ⁽¹⁾; Arrué Burillo, Paloma ⁽²⁾; Romero Miquel, Jordi
Françesc ⁽²⁾

⁽¹⁾ Universitat Politècnica de València, ⁽²⁾ Universitat Politècnica de València

The hydraulic study of water pipes both in project work, sizing and pressure analysis, as well as in the work of surveys or analysis of the pathologies or operation of existing facilities that do not provide the minimum operating conditions established by regulations, requires of knowledge of the absolute roughness of the material used.

This paper shows the experimental protocol for obtaining the absolute roughness of the material. The tests of two pipes of identical material (polypropylene) and geometric characteristics are performed, obtaining the value of the absolute roughness by means of the equations of the applicable fluid mechanics for any type of incompressible viscous fluid, as well as obtaining the value of the coefficient of Hazen-Williams friction applicable exclusively for pressurized water, in both cases in uniform and permanent turbulent regime. The results of the tests are validated by three methods, by applying the equations of fluid mechanics, by the Hazen-William equation and by studying by computational dynamics (CFD) that allows to know and quantify the distribution of pressures and water velocities inside the pipes, through the use of specific software.

Keywords: roughness; coefficient of friction; pressure losses; pipes; CFD

CARACTERIZACIÓN DE LA RUGOSIDAD ABSOLUTA DEL MATERIAL Y DEL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS

El estudio hidráulico de las conducciones de agua tanto en los trabajos de proyecto, dimensionamiento y análisis de presiones, como en los trabajos de peritaciones o análisis de las patologías o funcionamiento de instalaciones existentes que no proporcionan las condiciones mínimas de funcionamiento establecidas por normativa, requiere del conocimiento de la rugosidad absoluta del material utilizado.

En este trabajo se muestra el protocolo experimental de obtención de la rugosidad absoluta del material. Se realizan los ensayos de dos tuberías de idéntico material (polipropileno) y características geométricas, obteniendo el valor de la rugosidad absoluta mediante las ecuaciones de la mecánica de fluidos aplicable para cualquier tipo de fluido viscoso incompresible, así como la obtención del valor del coeficiente de fricción de Hazen-Williams aplicable exclusivamente para el agua a presión, en ambos casos en régimen turbulento uniforme y permanente. Los resultados de los ensayos se validan por tres métodos, mediante la aplicación de las ecuaciones de la mecánica de fluidos, por la ecuación de Hazen-William y mediante el estudio por dinámica computacional (CFD) que permite conocer y cuantificar la distribución de las presiones y velocidades del agua en el interior de las tuberías, mediante la utilización el software específico.

Palabras clave: rugosidad; coeficiente de fricción; pérdidas de carga; tuberías; CFD



©2020 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

En el estudio hidráulico del transporte de fluidos viscosos incompresibles a través de conducciones a presión, tanto en su fase de diseño y ejecución, como en explotación o bien para detectar ciertas patologías, es necesario conocer dos variables fundamentales, el caudal y la presión, para que la instalación reúna la condición de idoneidad, es decir, que en cualquier punto de la instalación estén dentro de los parámetros de calidad del suministro. Estas variables pueden obtenerse aplicando las ecuaciones de la mecánica de fluidos o utilizando software especializado. No obstante, la solución de los problemas requiere de antemano ciertos datos geométricos como la longitud de las tuberías, diámetros, cotas, rugosidad del material, y físicos, como la viscosidad cinemática y densidad del fluido a la temperatura de trabajo. Este artículo, estudia la caracterización de la rugosidad absoluta de las tuberías, con la finalidad de obtener el coeficiente de fricción de la ecuación de Darcy-Weisbach utilizando la ecuación de Colebrook-White, y el valor del coeficiente de rugosidad de la ecuación de Hazen-Williams utilizada ampliamente en EE. UU.

La caracterización se realiza en un banco de ensayos de la Universitat Politècnica de València, equipado con depósito de agua, dos bombas de velocidad fija y variable, caudalímetro, sondas termostáticas, tomas de presión y piezómetros diferenciales. Todo el equipo está equipado con tomas de datos electrónicos para su procesamiento mediante software especializado. Se han ensayado 2 tuberías del mismo material con un total de 18 ensayos, 9 ensayos por tubería y, 4 cálculos computacionales. En este artículo solo se muestran los resultados parciales y totales de la primera tubería y los totales de la segunda.

2. Objetivos

Mediante los ensayos experimentales en el laboratorio de dos tuberías de idéntico material en este caso polipropileno (PP) y características geométricas, se pretende obtener el valor de la rugosidad absoluta del material para la utilización de las ecuaciones de la mecánica de fluidos aplicable para cualquier tipo de fluido viscoso incompresible, así como la obtención del valor del coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams (aplicable para el agua), en ambos casos en agua a presión en régimen turbulento uniforme y permanente. Los resultados de los ensayos experimentales se validan utilizando dos métodos, por cálculo computacional, por una parte, a través del software Epanet (Rossman, 2000) ampliamente utilizado a nivel académico y profesional, y por otra parte, a través de dinámica computacional (CFD) mediante el software Solidworks 2019 Flow Simulation, (Dassault Systèmes, 2017).

3. Materiales y métodos

3.1 Metodología de cálculo

En base a la mecánica de fluidos se utilizan las ecuaciones aplicables a cualquier tipo de fluido viscoso a presión. La pérdida de carga de la tubería H_{rp} (mca) se obtiene mediante la ecuación de Darcy-Weisbach (Weisbach, 1855), (Darcy, 1865), (Weisbach et al, 1870), en función del caudal Q , siendo L y D la longitud y diámetro interior de la tubería, y λ el coeficiente de fricción (adimensional), ecuación 1 (unidades en el sistema internacional).

$$H_{rp} = \lambda \cdot \frac{L}{D^5} \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g} \quad (1)$$

El coeficiente de fricción λ se obtiene mediante la ecuación de Colebrook-White (Colebrook y White, 1937), siendo ε la rugosidad absoluta del material, y ν la viscosidad cinemática del

fluido, ecuación 2 (unidades en el sistema internacional).

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3.7 \cdot D} + \frac{2.51 \cdot \pi \cdot D \cdot v}{4 \cdot Q \cdot \sqrt{\lambda}} \right) \quad (2)$$

Ecuación que puede simplificarse a través de la ecuación de Swamee y Jain (1976) utilizada en el software Epanet, ecuación 3 (unidades en el sistema internacional).

$$\lambda = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3.7 \cdot D} + \frac{5.74}{\left(\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D \cdot v} \right)^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (3)$$

En base a la ecuación empírica de Hazen-Williams (Williams y Hazen, 1920), se obtiene el coeficiente de rugosidad o coeficiente de pérdidas de Hazen-Williams C del material de la tubería que se pretende determinar, siendo v la velocidad, S la pendiente de la tubería, adoptándose para los cálculos como pérdida de carga unitaria, ecuación 4 (unidades en el sistema internacional).

$$Q = 0,278 \cdot C \cdot D^{2,63} \cdot S^{0,54} \quad (4)$$

La modelización por CFD (Zienkiewicz y Taylor, 2000), (Bratanow, 1978), (Fernández, 2012) aplicable a cualquier tipo de fluido viscoso real incompresible a presión, se utilizarán las ecuaciones de Navier-Stokes y de Euler, ecuación 5.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial F_i}{\partial x_i} + \frac{\partial G_i}{\partial x_i} + Q = 0 \quad (5)$$

3.2 Características de los materiales

Se han analizado dos tuberías de polipropileno (PP) según norma EN ISO-15874-2, cuyos diámetros interiores se han obtenido promediando 10 mediciones, siendo el valor obtenido en ambos materiales de 12.85 milímetros. Las propiedades de las tuberías, ambientales y del fluido se indican en la tabla 1.

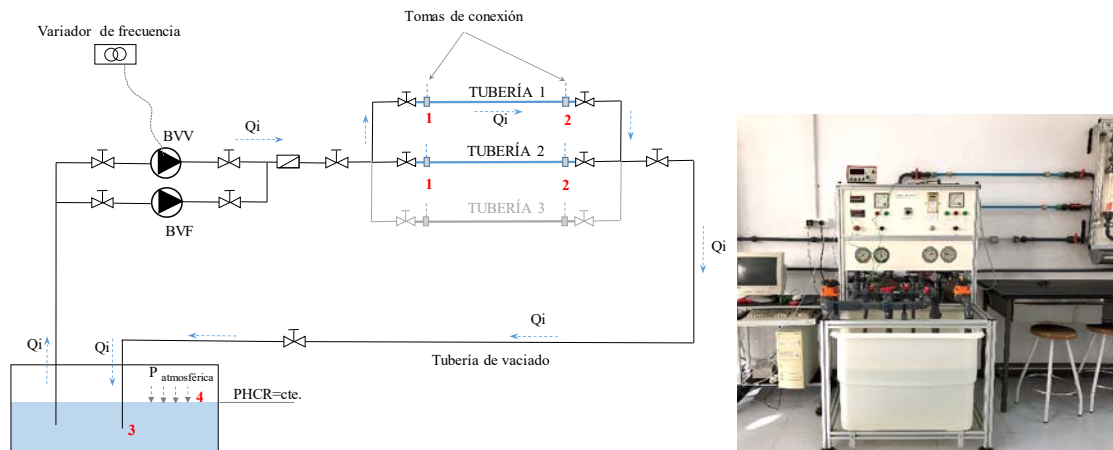
Tabla 1. Propiedades de los materiales, ambientales y del fluido a ensayo

Propiedades geométricas		Propiedades ambientales		Propiedades del fluido	
Longitud	0.80 m	Temperatura ambiente	21°C	Tipo	Agua
Diámetro exterior	20 mm	Presión barométrica	1021 mbar	Temperatura	15°C
Espesor	3.57 mm	Humedad relativa	60%	Densidad	999.15 kg/m ³
Diámetro interior	12.85 mm	Altura sobre el nivel del mar	10 m	Viscosidad cinemática	1.135E-06 m ² /s

3.3 Características del ensayo

El esquema del banco de ensayos viene dado por la figura 1 y está compuesto por dos bombas hidráulicas iguales del mismo fabricante, una bomba de velocidad variable (BVV) y otra, de velocidad fija (BVF). Las bombas hidráulicas están situadas en la parte central del banco de ensayos, el piezómetro diferencial de agua situado a la izquierda, y las tuberías de ensayo situado en la parte de la derecha.

Figura 1: Esquema del banco de ensayos



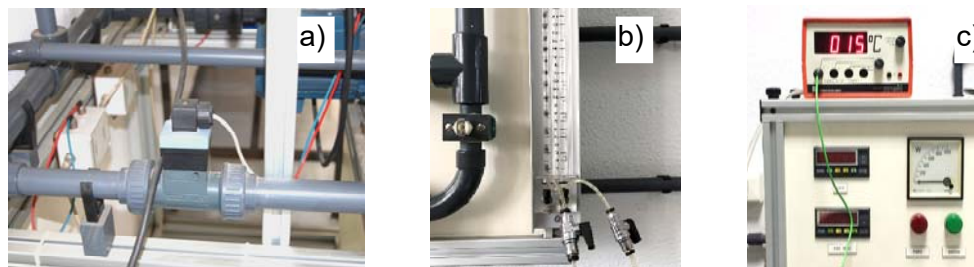
Cada bomba hidráulica posee un manómetro, un vacuómetro, un amperímetro, un voltímetro y un vatímetro. La BVV dispone de un variador de frecuencia y de un frenómetro. Los caudales experimentales se han medido a través de un caudalímetro con conexión electrónica con autómatas programables instalados en el banco de ensayos, figura 2 a). La distancia entre el caudalímetro y los accesorios es mayor de diez veces el diámetro de la tubería, con la finalidad de evitar turbulencias que puedan alterar la medición del caudal. La curva de funcionamiento y de rendimiento modelizada (Romero y Arrué, 2010) para cada una de las bombas hidráulicas vienen dadas por las ecuaciones 6 y 7 para un número de revoluciones por minuto constante de $n_0=2816$ rpm, $H_m(Q)$ mca, Q m³/h y $\eta(Q)$ %.

$$H_m(Q) = 22.1490 + 0.4434 \cdot Q - 0.3855 \cdot Q^2 \quad (6)$$

$$\eta(Q) = 19.6387 \cdot Q - 2.3526 \cdot Q^2 \quad (7)$$

Los datos de presión, caudal, potencia, tensión e intensidad eléctrica se realizan a través de conexiones y se procesan por computadora. La medición de la pérdida de carga se ha realizado mediante piezómetro diferencial de agua de precisión de 1 mmca, figura 2 b). El fluido utilizado en el ensayo ha sido agua potable (Ministerio de la Presidencia, 2003) a temperatura constante a 15°C medido con sonda termostática, figura 2 c). Con objeto de que la recirculación del agua en el banco de ensayos no provoque un aumento de la temperatura debido a la fricción del agua en el interior de las tuberías durante el periodo de ensayo, se ha dimensionado un depósito abierto lo suficientemente grande para disipar el calor mediante la refrigeración por aire con ventilación natural a temperatura ambiente.

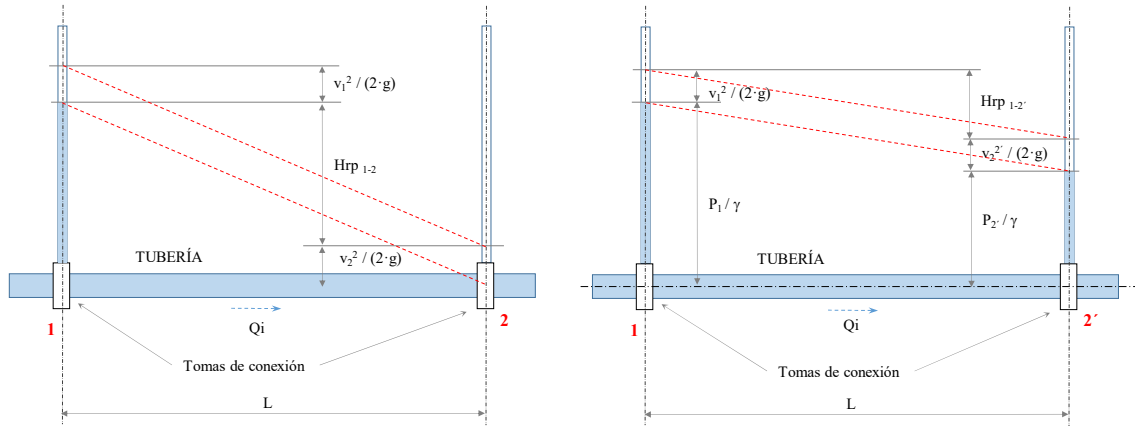
Figura 2: a) Caudalímetro, b) piezómetro diferencial de agua y c) sonda termostática



Se han disminuido al mínimo la pérdida de carga total, $H_r=H_{rp}+H_{rs}$ (tubería más accesorios), aguas abajo de la conexión 2' (instalación de vaciado), figura 3. Para ello se han instalado en el banco de ensayos, aguas abajo de la conexión 2', tuberías de PVC nuevas de mayor

calibre que las sometidas a ensayo, por su baja rugosidad absoluta, con una mínima instalación de accesorios (2 codos de 90° y 1 conexión en el nudo 2'). El objetivo es reducir en la medida de lo posible la contrapresión en la conexión 2' que se genera en el ensayo.

Figura 3: Pérdidas H_{rp1-2} para $P_2 = P_{atmosférica}$ y $P_2 > P_{atmosférica}$



Las tomas de conexión de las tuberías a ensayo con el piezómetro diferencial, figura 4, se han realizado mediante tubos poliméricos semirrígidos transparentes de pequeño calibre, con enganches rápidos de doble retención para impedir la entrada de aire al sistema, así como el descebe de las tuberías. Para evitar turbulencias, el caudalímetro con conexión electrónica con autómatas programables se ha instalado aguas arriba de la conexión 1 a una distancia mínima de diez veces el diámetro de la tubería de cualquier accesorio y las conexiones a cinco veces de su unión con el banco de ensayos.

Figura 4: a) Tubería 1 (superior) y 2 (inferior), b) toma de conexión y c) uniones



3.4 Condiciones de contorno

Se han ensayado dos tuberías de idéntico material en régimen turbulento (Zhang, 2017). La obtención de las pérdidas de carga primarias en las tuberías H_{rp} , se ha realizado variando el caudal inyectado Q , controlado mediante el variador de frecuencia de la BVV. Las características de funcionamiento de la BVV, con relación al número de revoluciones por minuto con respecto al nominal, α y el rendimiento $\eta(Q)$, se obtienen con las ecuaciones 8 y 9, en el que $H_m(Q)$ viene en mca, Q en m^3/h , y $\eta(Q)$ %.

$$H_m(Q) = \alpha^2 \cdot 22.1490 + \alpha \cdot 0.4434 \cdot Q - 0.3855 \cdot Q^2 \quad (8)$$

$$\eta(Q) = \frac{19.6387}{\alpha} \cdot Q - \frac{2.3526}{\alpha^2} \cdot Q^2 \quad (9)$$

Cada tubería se ha sometido a 9 ensayos (Box, Hunter J.S. y Hunter, W.G., 2008) con el objetivo de obtener un muestreo representativo. Cada una de las tuberías se han ensayado

en posición horizontal para evitar contrapresiones debido al peso del fluido por diferencia de cota. Se considera para los cálculos el campo gravitatorio con un valor de la gravedad de 9.81m/s^2 (Newton, 1642-1727, 2012).

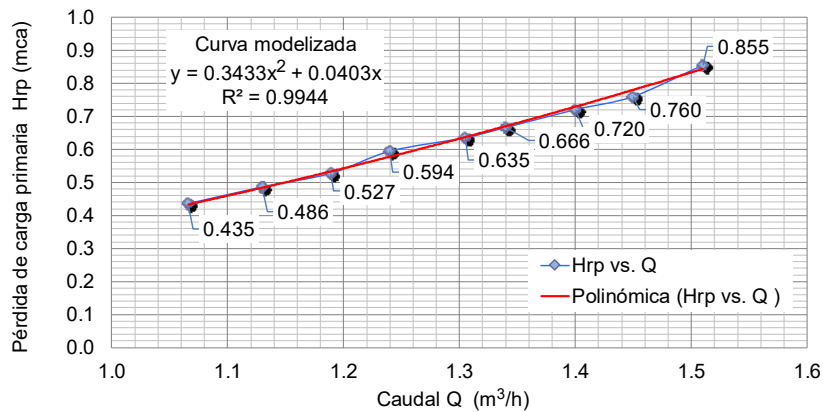
Las velocidades máximas del agua en el interior de las tuberías no han sobrepasado de 3.5m/s por razones de servicio y de diseño de las instalaciones, según la exigencia HS-4 del CTE (Ministerio de vivienda, 2006) suministro de agua para las tuberías de material termoplástico y multicapa.

El ajuste de las pérdidas de carga primaria con el caudal se ha realizado mediante regresión parabólica por mínimos cuadrados (Valderrama, 1995), (Thomas y Ríos, 1978).

4. Resultados

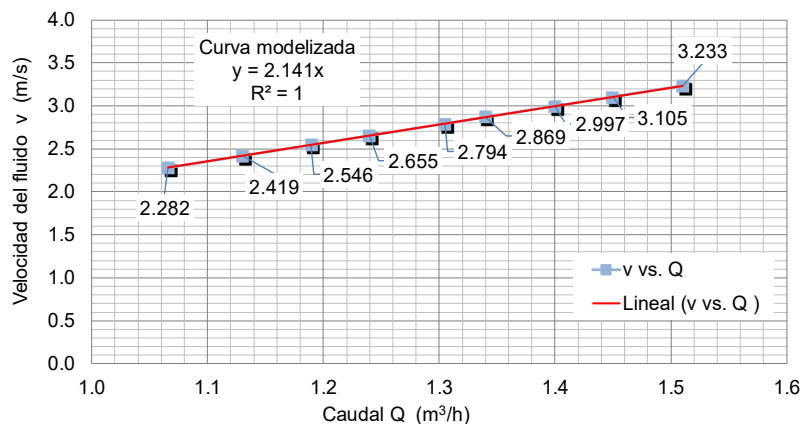
La representación gráfica de los resultados experimentales de la correlación entre la pérdida de carga en la tubería H_{rp} con respecto al caudal Q se indican en la figura 5.

Figura 5: Tubería 1. Correlación H_{rp} (mca) vs. Q (m^3/h)



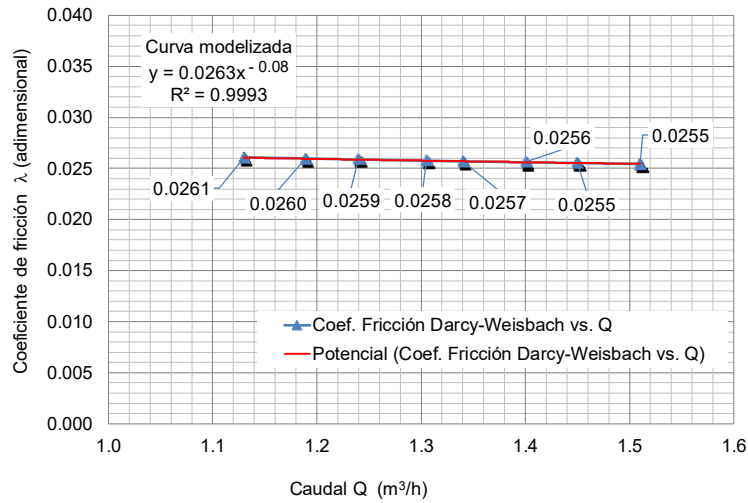
Mediante estos resultados se ha procedido a comprobar las velocidades del agua v por el interior de la tubería, cuya representación gráfica se indica en la figura 6, comprobándose que se encontraba en régimen turbulento, para que las ecuaciones 2, 3 y 4 sean válidas.

Figura 6: Tubería 1. Correlación v (m/s) vs. Q (m^3/h)



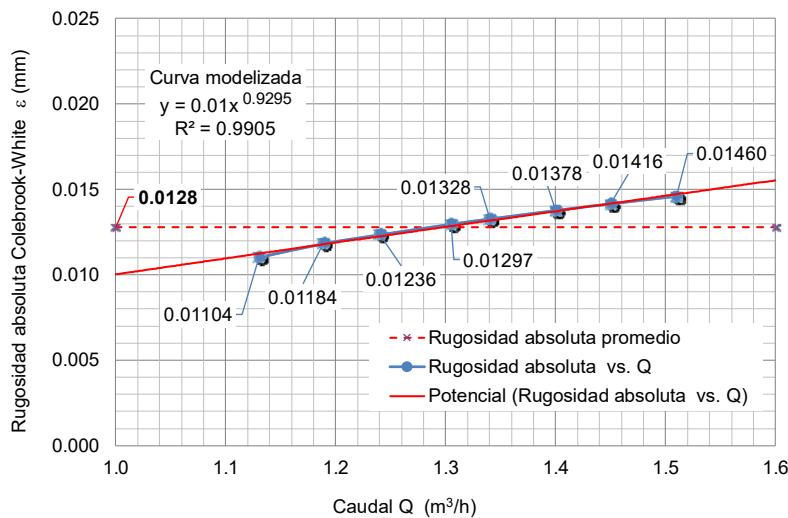
Mediante las ecuaciones de Darcy-Weisbach y de Colebrook-White, se han obtenido los valores del coeficiente de fricción λ , figura 7, y el de la rugosidad absoluta, figura 8.

Figura 7: Tubería 1. Correlación λ (adimensional) vs. Q (m³/h)



El valor máximo del coeficiente de fricción ha sido de $\lambda=0.0261$ y el mínimo de $\lambda=0.0255$, con una desviación del 2.35%, valores justificados por la variación del caudal y la pérdida de carga en cada ensayo.

Figura 8: Tubería 1. Correlación ε (mm) vs. Q (m³/h)

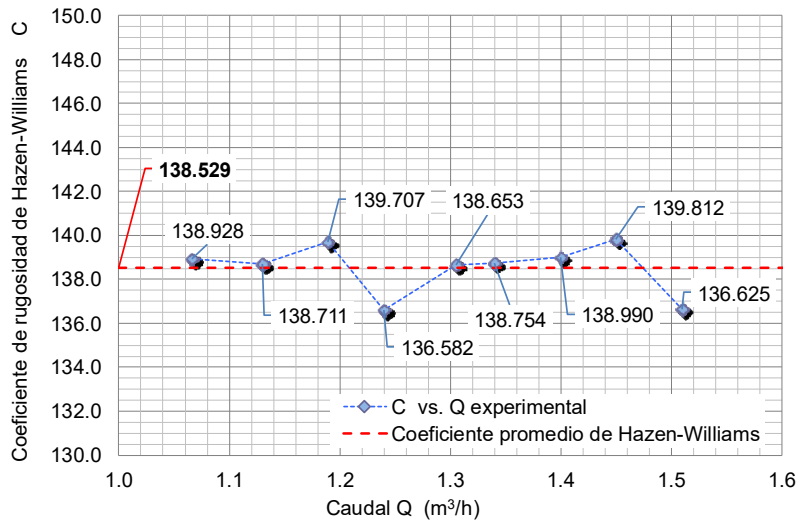


El valor máximo y mínimo de la rugosidad absoluta ha sido de $\varepsilon=0.0146$ y 0.01104 milímetros respectivamente, cuyo error en toda la serie estudiada ha sido del 32.24%, equivalente a $\varepsilon=\pm 0.00356$ milímetros. Adoptándose como valor promedio de la rugosidad absoluta de la tubería 1 es de $\varepsilon=0.0128$ milímetros, y de la tubería 2 de $\varepsilon=0.0130$ milímetros.

Los resultados experimentales de la rugosidad absoluta en el material ensayado están dentro de los valores normales (Romero y Arrué, 2010), (Agüera, 2002), (Mataix, 2004).

Mediante la ecuación de Hazen-Williams, el valor promedio del coeficiente de Hazen-Williams para la tubería 1 es, $C=138.529$ y para la tubería 2 de $C=138.535$. La figura 9 representa el coeficiente de Hazen-Williams con respecto al caudal.

Figura 9: Tubería 1. Correlación C (adimensional) vs. Q (m³/h)



No se puede modelizar el coeficiente de Hazen-Williams con el caudal, debido a que la ecuación es del tipo empírico. Los valores de los coeficientes de Hazen-Williams en el material ensayado están dentro de los valores normales de la bibliografía científica, (Williams y Hazen, 1920), (Hughes y Brighton, 1970).

4.1 Validación de los ensayos mediante las ecuaciones de la mecánica de fluidos

En este apartado lo que se pretende es conocer, comparar y validar los ensayos en las tuberías en el banco de ensayos con las ecuaciones de la mecánica de fluidos. Los resultados para el ensayo número 9 correspondiente a un caudal de 1.51 m³/h en la tubería 1, y viene dado en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados obtenidos para el ensayo número 9 de la tubería 1

Resultados experimentales	Resultados mediante las ecuaciones de mecánica de fluidos	
Pérdida de carga 0.855 mca	Coefficiente de fricción Colebrook-White	0.0251975
	Pérdida de carga por Darcy-Weysbach	0.836 mca
	Presión relativa conexión 2	0.409 mca
	Pérdida de carga total tubería de vaciado	2.188 mca

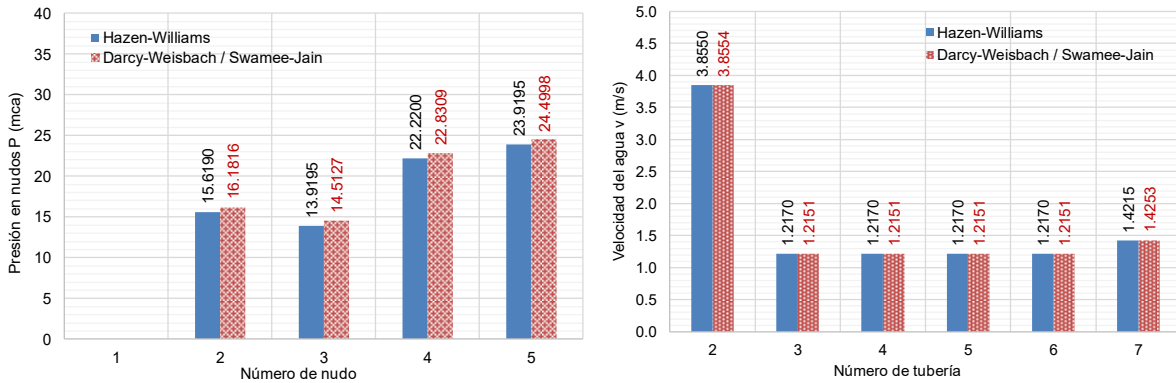
En la tubería sometida a estudio las pérdidas de carga H_{rp} mediante las ecuaciones de la mecánica de fluidos es de 0.836 mca, valor muy aproximado al resultado del ensayo de 0.855 mca. La pérdida de carga es inferior al resultado experimental en un 2.22% en la tubería 1 y en un 3.66% en la tubería 2. Estas variaciones son atribuibles en gran medida al utilizar en los cálculos el valor de la rugosidad absoluta promedio de todos los ensayos.

4.2 Validación de los ensayos mediante cálculo por EPANET

La validación de los ensayos se realiza a través de una instalación formada por dos mallas compuesta por siete tuberías de 10 metros de longitud cada una con diámetro interior 12.87 milímetros y demanda en cuatro nudos, utilizando el software Epanet (Rossman, 2000). A partir del coeficiente de rugosidad experimental de Hazen-Williams $C=138.529$ y de la rugosidad absoluta promedio experimental de $\varepsilon=0.0128$ milímetros, se indica el resultado

obtenido correspondiente al ensayo número 9 de la tubería 1, de la presión final en cada nudo de la malla, figura 10.

Figura 10: Tubería 1, ensayo número 9. Correlación P (mca) y v vs. Número de nudo (Ud), mediante Hazen Williams, Darcy-Weisbach y Swamee-Jain

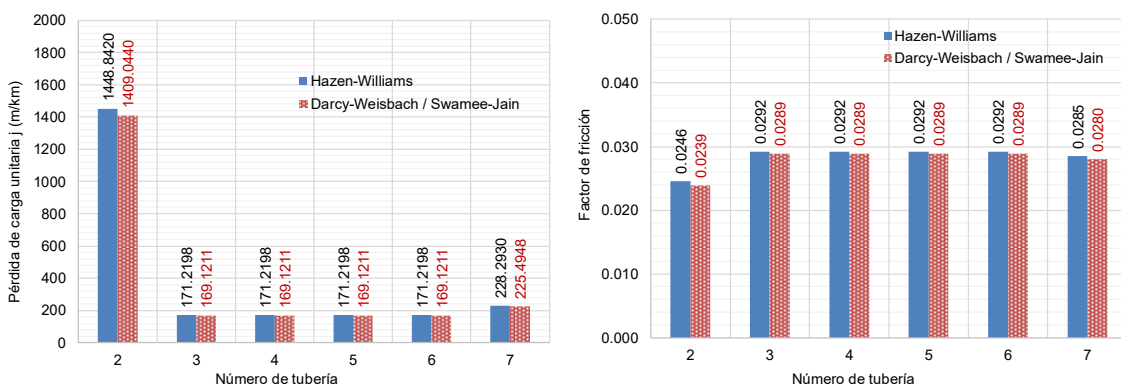


La presión en todos los nudos de la malla obtenida mediante coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams es ligeramente inferior a la obtenida con el coeficiente de fricción λ de Swamee y Jain (1976) utilizado por Epanet. Las velocidades del agua en toda la malla por Hazen-Williams son ligeramente superiores a las de Darcy-Weisbach. El resultado es coherente, dado que en las presiones en los nudos ocurre totalmente lo contrario, como consecuencia de la aplicación de la ecuación de la energía de Bernoulli (1738) para fluidos viscosos incompresibles en un sistema isotérmico.

Con respecto a la pérdida de carga unitaria en la tubería 1, al haber mayor velocidad del agua por Hazen-Williams es lógico pensar que la pérdida de carga unitaria será mayor por este método que por Darcy-Weisbach. La pérdida de carga unitaria en todas las tuberías por Hazen-Williams es ligeramente superior.

En la figura 11 se correlaciona la pérdida de carga unitaria y el factor de fricción, con cada una de las tuberías de la malla. El factor de fricción de Hazen-Williams son ligeramente superiores a los de Swamee-Jain. Los coeficientes o factores de fricción poseen coherencia con el resto de los resultados, tanto con la presión, velocidad y pérdida de carga unitaria.

Figura 11: Tubería 1. Correlación j_{rp} (mca/km) y factor de fricción vs. Número de tubería



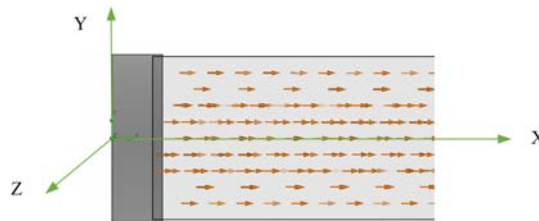
Es muy difícil que los resultados obtenidos por los dos métodos estudiado coincidan, dado que, el de Hazen-Williams es un método empírico y en cambio por Darcy-Weisbach /Swamee-Jain corresponde a un método científico. No obstante, los valores obtenidos son

muy aproximados y el error cometido muy pequeño, por lo que el valor del coeficiente promedio de Hazen-Williams obtenido en los ensayos $C=138.529$ es razonablemente válido.

4.3 Validación de los ensayos mediante cálculo computacional por dinámica de fluidos (CFD)

El objetivo es validar los resultados por dinámica computacional CFD con los ensayos realizados en el laboratorio, así como conocer y cuantificar la distribución de las presiones y velocidades del agua en el interior de las tuberías, mediante la utilización del software específico Solidworks 2019 Flow Simulation, (Dassault Systèmes, 2017). El eje de coordenadas X corresponde con el eje longitudinal de la tubería, el eje Y al campo gravitacional con una aceleración de -9.81 m/s^2 , y el eje Z corresponde a la sección transversal, figura 12.

Figura 12: Detalle de la ubicación de los ejes X, Y, Z, y la dirección del flujo



Las variables del ensayo número 9 de la tubería 1 se indican en la figura 13, y los resultados por CFD de las distribuciones de presiones y velocidades en sección longitudinal se indican en las figuras 14 y 15.

Figura 13: Tubería 1, ensayo número 9. Variables de cálculo

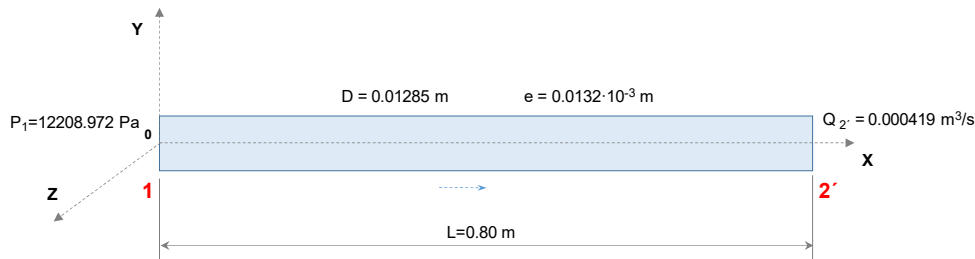
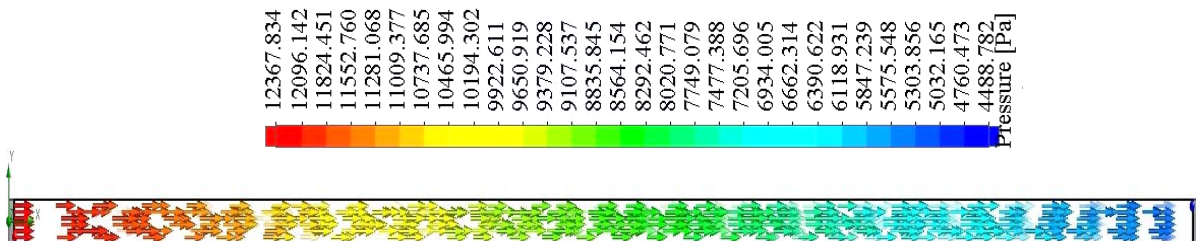
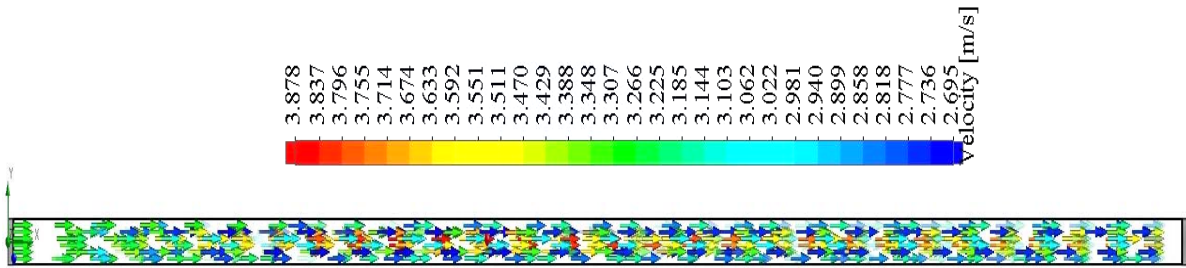


Figura 14: Tubería 1, ensayo número 9. Distribución longitudinal de las presiones del fluido



En la figura 14, se aprecia en el punto de origen 0, que la máxima presión ha sido de 12367.83 Pa (color rojo), mientras que, a medida que el fluido recorre la longitud de la tubería la presión va disminuyendo provocado por la pérdida de carga cambiando de color, pasando del rojo al naranja, amarillo verde y azul claro, siendo el punto de menor presión al final de la tubería con un valor de 4488.78 Pa (color azul intenso).

Figura 15: Tubería 1, ensayo número 9. Distribución longitudinal de velocidades del fluido



A lo largo de la tubería 1 de la figura 15, se observa que la velocidad no es uniforme, tal y como se puede comprobar por el color de las líneas de corriente. En la parte central de la tubería la velocidad es mayor, del orden de 3.87 m/s (color rojo), y va disminuyendo a medida que el fluido está más cerca de la superficie interior de la tubería, siendo el valor mínimo de 2.69 m/s (color azul).

La distribución transversal de presiones y velocidades desde la toma de conexión (punto de origen cero) a una distancia de 2 y 792 milímetros se indican en la figura 16 y 17.

Figura 16: Tubería 1. a) Distribución transversal de presiones (Pa) y b) velocidades (m/s)
Distancia desde origen X=2 mm, Q=1.51 m³/h, ε = 0,0128 mm

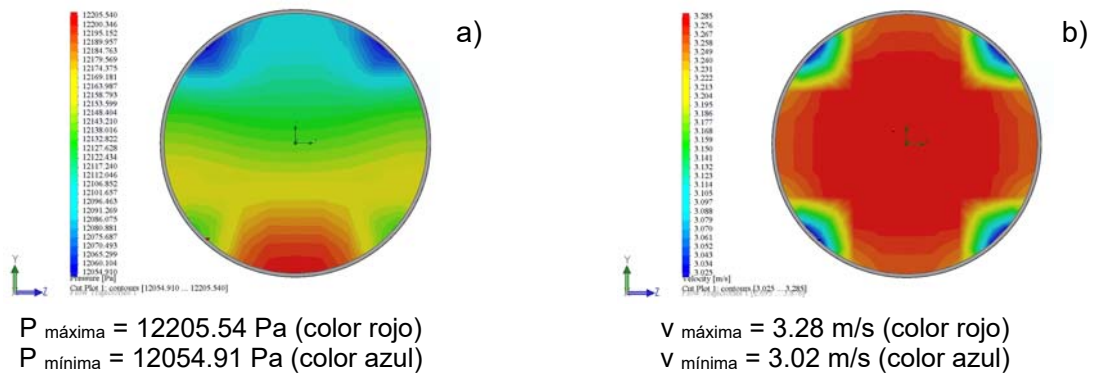
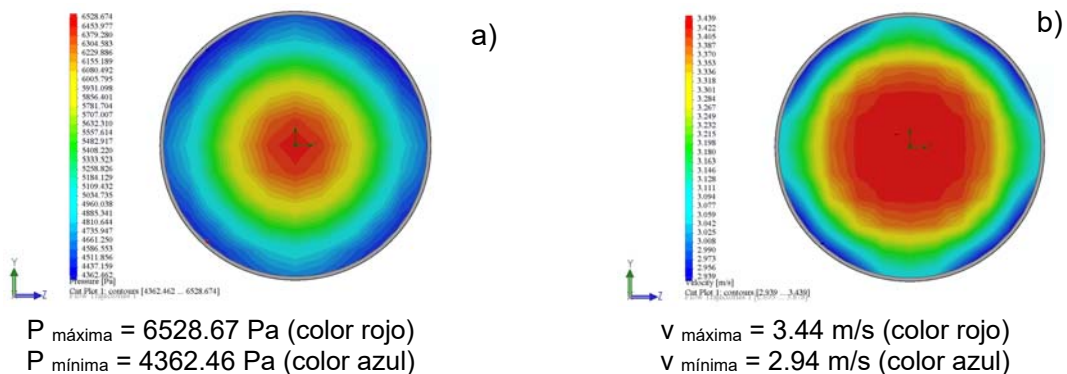


Figura 17: Tubería 1. a) Distribución transversal de presiones (Pa) y b) velocidades (m/s)
Distancia desde el origen X=792 mm, Q=1.51 m³/h, ε = 0,0128 mm



La comparación de las pérdidas de carga experimentales de la tubería 1 en el ensayo número 9 de 0.855 mca y por CFD de 0.8738 mca son bastante aproximadas, el error es del 2.19% en exceso por CFD. Esto viene justificado por haber utilizado en la modelización por CFD el valor promedio de la rugosidad absoluta del material.

Durante la modelización por CFD se aprecian errores en la temperatura del orden de 0.0004%, y en la densidad del 0.000026%, siendo la transferencia calor prácticamente nula, por tanto, el sistema se comporta de forma isotérmica. Los errores son debidos a la elección y el grado de refinamiento de la malla en la simulación.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos son válidos exclusivamente para el fluido ensayado, siendo este agua potable (Ministerio de la Presidencia, 2003) a temperatura constante de 15°C, en régimen turbulento y con tuberías nuevas aportadas por el fabricante.

Los valores promedio experimentales de la rugosidad absoluta para cada una de las tuberías sometidas a ensayo son $\varepsilon=0.0128$ milímetros para la tubería 1 y $\varepsilon=0.0130$ milímetros para la tubería 2. Los coeficientes de rugosidad de Hazen-Williams promedios para cada una de las tuberías sometidas a ensayo son $C=138.529$ para la tubería 1 y $C=138.535$ para la tubería 2.

Según los resultados obtenidos tanto en el banco de ensayos, como en el cálculo computacional por Epanet y CFD, son muy aproximados y pueden adoptarse como válidos desde el punto de vista práctico. Los errores obtenidos son prácticamente despreciables, teniendo en cuenta que un sistema dinámico en redes malladas simples y/o complejas existen otras variables que influyen mucho más en el error, como tuberías de distinto material, accesorios, válvulas de retención y regulación, etc.

En los proyectos es recomendable aumentar de forma generosa la rugosidad de las tuberías facilitadas por el fabricante, dado que, la rugosidad suele aumentar con el tiempo en servicio debido a la deposición de carbonato cálcico para índices de Langelier superiores a +0.5 en tuberías poliméricas, o deposiciones de óxido de hierro de accesorios metálicos para índices de Langelier negativos, y por último, por degradación del propio material.

6. Referencias

- Agüera, J. (2002). *Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas* (5ª ed.). Madrid: Ciencia 3.
- Bernoulli, D. (1738). *Hydrodynamica: sive de viribus et motibus fluidorum commentarii*. Johannis Reinholdi Dulseckeri.
- Box, G. E. P., Hunter, J. S., & Hunter, W. G. (2008). *Estadística para investigadores: diseño, innovación y descubrimiento* (2ª ed.). Barcelona: Reverté.
- Bratanow, T. (1978). Navier-Stokes equations: theory and numerical analysis: R. Teman North-Holland, Amsterdam and New York. 1977. 454 pp. (Book Review). Applied Mathematical Modelling. [https://doi.org/10.1016/0307-904X\(78\)90012-4](https://doi.org/10.1016/0307-904X(78)90012-4)
- Colebrook, C. F., & White, C. M. (1937). Experiments with Fluid Friction in Roughened Pipes. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 161(906), 367–381. <https://doi.org/10.1098/rspa.1937.0150>
- Colebrook, C. F. (1939). Turbulent Flow in Pipes, with Particular References to the Transition Region Between the Smooth and Rough Pipe Laws. Journal of the Institution of Civil Engineers, 11(October 1939), 133–156. <https://doi.org/10.1680/ijoti.1939.14509>
- Darcy, H. (1865). Recherches hydrauliques: 1: Recherches expérimentales sur l'écoulement de l'eau dans les canaux découverts. Dunod.
- Dassault Systèmes (n.d.-h). SOLIDWORKS. Retrieved from: <https://www.solidworks.com>.

- Fernández, J. M. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos*. Barcelona.: Reverté.
- Hughes, W. F., & Brighton, J. A. (1970). *Teoría y problemas de dinámica de fluidos*. Panama, etc.: McGraw-Hill.
- Mataix, C. (2004). *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas* (2ª ed.). México: Oxford University Press.
- Ministerio de la Presidencia. (2003). Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. Boletín Oficial Del Estado, 7228–7245. Retrieved from <http://www.boe.es/boe/dias/2003/02/21/pdfs/A07228-07245.pdf>.
- Ministerio de vivienda. (2006). REAL DECRETO 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. Boletín Oficial Del Estado, (74), 11816–11831. Retrieved from <http://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/realDecreto/RD3142006.pdf>.
- Newton, I. Sir. (2012). *Philosophiæ naturalis principia mathematica*. Jussu Societatis Regiæ ac Typis Joseph Streater.
- Romero, A. M., & Arrué, P. (2010). *Cálculo de instalaciones hidrosanitarias con software para calculadora gráfica HP y Excel: (adaptado al CTE, exigencias HS-4 y HS-5)*. Tomo I. València: Universitat Politècnica de València.
- Rossman, L.A. (2000). EPANET. Software That Models the Hydraulic and Water Quality Behavior of Water Distribution Piping Systems. Cincinnati, OH 45268: U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Retrieved from <https://www.epa.gov/water-research/epanet>.
- Swamee, P. K. & Jain, A. K. (1976). Explicit equations for pipe-flow problems. *Journal of Hydraulics Division* (ASCE), 102 (5), pp. 657-664.
- Thomas, L., & Ríos, M. E. (1978). *Ampliación de matemáticas y programación*. Santander: (Graf. Jean).
- Valderrama, M. J. (1995). *Modelos matemáticos en las ciencias experimentales*. Madrid: Pirámide.
- Weisbach, J. L. (1855). Die experimental-hydraulik. J.G. Engelhardt. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2027/mdp.39015010638651>.
- Weisbach, J. L., Klein, J. F., Herrmann, G., Buel, R. H, Du Bois, A. J, & Coxe, E. B. (1870). *Mechanics of engineering and of machinery*. Wiley etc. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2027/uc1.b2982372>.
- Williams, G. S., & Hazen, A. (1920). *Hydraulic tables* (3rd. ed..). New York, etc.: John Wiley & Sons.
- Zhang, Y. (2017). *Critical transition Reynolds number for plane channel flow*. English Edition, 38(10), 1415–1424. <https://doi.org/10.1007/s10483-017-2245-6>.
- Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2000). *The finite element method. Volume 3, Fluid dynamics* (5th ed..). Oxford [etc.]: Butterworth-Heinemann.

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

