

HIDRODINÁMICA

Clase de Ramiro Mege para
Magíster Náutico y Marítimo

15 Abril 2011
Apunte: Nelson Moraga

MECANICA DE FLUIDOS

Vamos a hacer un rápido repaso de lo que vimos para poder seguir avanzando.

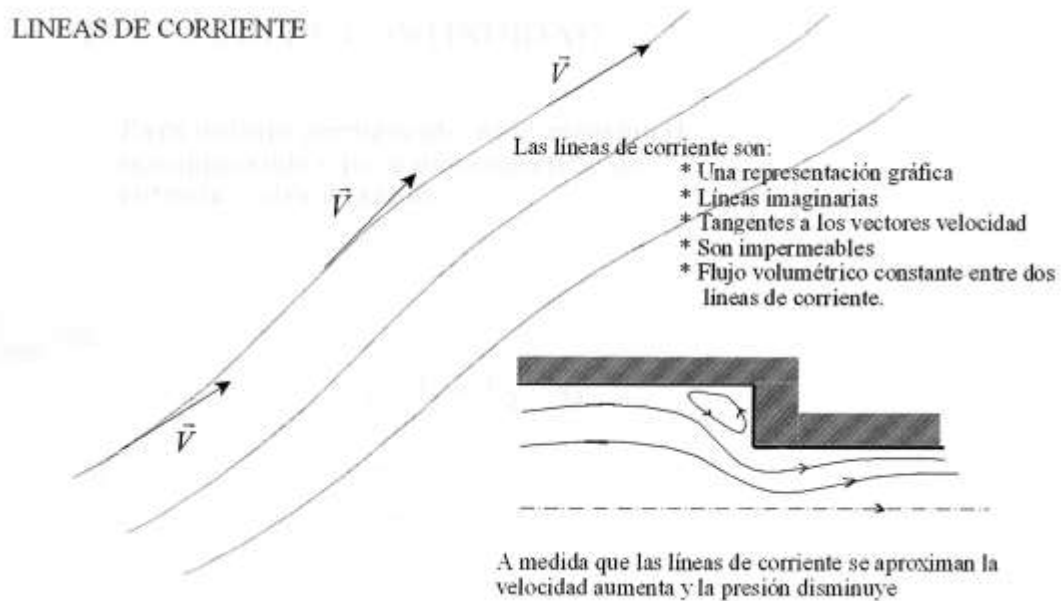


Fig 1

Estas son las líneas de corriente (Fig 1). Las líneas de corriente son una representación gráfica, son líneas imaginarias, pero que tratan de representar cómo es un flujo, pero a pesar de que son líneas imaginarias tienen ciertas particularidades. Aquí hay unas líneas verdes. Vamos a dibujar 3. Todas las que quisiéramos y son todas más o menos parecidas.

Estas son las líneas de corriente que no se ven, las que yo he puesto ahí en azul y tienen algunas características importantes. Si nosotros midiéramos la velocidad en ese punto, por ejemplo, veríamos que el vector velocidad, cuando yo digo vector velocidad, estoy midiendo tres cosas: la magnitud que es generalmente lo que a nosotros nos interesa tanto kilómetros por hora, tantos kilómetros por segundo, etc. (la magnitud), pero también está la dirección y el sentido. Cuando es un vector de velocidad tiene tres características: magnitud, dirección y sentido. Entonces aquí tenemos el vector trazado. La longitud del vector

representa la magnitud y naturalmente su posición la dirección y el sentido ¿qué particularidad tiene la línea de corriente? Que son tangentes a los vectores de velocidad. Entonces está el vector ahí y la línea de corriente en este punto del vector de velocidad y aquí como la línea cambia de dirección quiere decir que cambió de posición el vector velocidad, allá tiene otra posición, pero todos los puntos son tangentes ¿Qué importancia tiene eso? Que en la línea de corriente el vector velocidad no tiene ningún componente en esa dirección, en una dirección distinta, por ejemplo, si no fuera tangente y yo lo dibujara ¡A! ese es mi vector velocidad ¡A! tendría una componente así y una componente así. Esta sería en sentido perpendicular a la línea de corriente, la atravesaría, pero en este caso que está aquí como es tangente esto no pasa, no tiene una componente que atraviese la línea de corriente ¿Eso qué importancia tiene? Que entonces son impermeables. Cuando yo tomo una línea de corriente no hay fluido que la atraviese hay fluido que corre por la línea de corriente, pero no la atraviesa. Podríamos decir que cuando tengo una serie de hilo y los pongo al viento cada uno de los hilos representa una línea de corriente podrán llegar a tocarse, pero nunca se atraviesan no pueden haber en un mismo punto dos vectores que sean tangentes a la línea de corriente y que tengan distinta dirección, eso es importante, son impermeables.

Ahora, como nosotros decíamos el otro día, cuando vimos la ecuación de continuidad, cuando la velocidad aumenta quiere decir que el área del ducto disminuyó, cuando el área del ducto aumenta la velocidad decrece y aquí se cumple eso.

Ecuación de continuidad:

$$V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2$$

La separación entre dos líneas de corriente obedece a eso. El caudal; la cantidad de líquido que pasa entre estas dos líneas de corriente, aquí, la cantidad de líquido que pasa por aquí la vamos a llevar un B. es lo mismo que pasa acá B. atraviesa entre las dos, lo mismo que pasa aquí pasa allá. Cuando se separan las líneas de corriente quiere decir que la velocidad disminuye cuando se juntan la velocidad aumenta. Aquí en esta esquina tengo yo la pared de un ducto que bruscamente se redujo, y al otro lado

sería lo mismo, entonces vendrían las líneas de corriente y hacen esta trayectoria. Aquí están más separadas aquí se juntan, aquí se separan otro poquito quiere decir que aquí se acelera el flujo, aquí estas líneas de corriente van en esa dirección y aquí hay un remanso en la esquina, nosotros lo vemos en los ríos que de repente hay una roca y en la roca se produce una contra corriente, en la esquina se produce una contra corriente.

Tenemos otra línea de corriente que viene aquí justo por el centro y sigue esa trayectoria, pero si Uds. se fijan aquí esto se estrechó, vale decir, aquí en esta parte también pasó una anomalía, entonces a través de las líneas de corriente queremos representar como se está produciendo el flujo ¿Eso habría alguna manera de visualizarlo? Sí, era lo que hacíamos en el canal, le echábamos partículas de plástico blanco y se saca una foto con tiempo y uno ve la partícula la trayectoria que sigue y esa trayectoria es una línea de corriente. Entonces uno ve cómo rodea al cuerpo que nosotros tenemos y en el túnel de viento metemos humo y el humo nos está mostrando cómo son las líneas de corriente cómo lo aumenta, cómo lo acelera, cómo detrás del cuerpo se forma algún torbellino, así que si bien son líneas imaginarias pueden ser observadas a través de partículas que nosotros echamos en un líquido cualquiera. Es una manera de representar un flujo y se ocupa bastante, precisamente para eso. Es una de las cosas que no había conversado yo el otro día, pero seguramente lo vamos a dibujar más de una vez el camino de corriente para darnos una idea de qué es lo que está sucediendo. Acá la segunda nos indica la ecuación de continuidad que era lo que estábamos conociendo recién la velocidad por el área, viene siendo el caudal, el caudal que entra a un sistema, el caudal que sale independientemente de si varían las áreas, varían las velocidades al aumentar el área disminuye la velocidad y a la inversa que ya lo teníamos listo.

Esta tablita tampoco la habíamos visto (Fig 2), estas son las tuberías comerciales de acero, según la norma que está indicada ahí y aquí dice *cédula* o también puede decir SCH que es cédulas muchas veces se dice SCH cuando es un dibujo coloca el diámetro de la tubería ¿Qué representa esta *cédula*? Este número que está acá tiene que ver con el espesor de la

cañería, estas son cañerías de acero. Entonces las de cédula 10 son de espesor delgado, 20 más grueso, 30 más grueso todavía, 40 jesta es una tubería de 2"! le venden *cédula* 40, aunque no lo pida es la que viene, es

TUBERIAS COMERCIALES DE ACERO *** ANSI B36.10:1970 Y BS 1600: PARTE 2 1970

Cédula	Medida nominal in	Diámetro exterior mm	Espesor mm	Diámetro interior mm	Cédula	Medida nominal in	Diámetro exterior mm	Espesor mm	Diámetro Interior mm	
10	14	355,6	6,35	342,9	80 (XS)	3/4	26,7	3,91	18,9	
	16	406,4	6,35	393,7		1	33,4	4,55	24,3	
	18	457,2	6,35	444,5		1 1/4	42,2	4,85	32,5	
	20	508,0	6,35	495,3		1 1/2	48,3	5,08	38,1	
	24	609,6	6,35	596,9		2	60,3	5,54	49,2	
20	30	762,0	7,92	746,2		2 1/2	73,0	7,01	59,0	
	8	219,1	6,35	206,4		3	88,9	7,62	73,7	
	10	273,0	6,35	260,3		3 1/2	101,6	8,08	85,4	
	12	323,9	6,35	311,2		4	114,3	8,56	97,2	
	14	355,6	7,92	339,8		5	141,3	9,52	122,3	
	16	406,4	7,92	390,6		6	168,3	10,97	146,4	
	18	457,2	7,92	441,4		8	219,1	12,70	193,7	
30	20	508,0	9,52	489,0		10	273,0	15,09	242,8	
	24	609,6	9,52	590,6		12	323,9	17,47	289,0	
	30	762,0	12,70	736,6	14	355,6	19,05	317,5		
	40 (STD)	8	219,1	7,04	205,0	16	406,4	21,44	363,5	
		10	273,0	7,80	257,4	18	457,2	23,82	409,6	
		12	323,9	8,38	307,1	20	508,0	26,19	455,6	
		14	355,6	9,52	336,6	24	609,6	30,96	547,7	
16		406,4	9,52	387,4	100	8	219,1	15,09	188,9	
18		457,2	11,13	434,9		10	273,0	18,26	236,5	
20		508,0	12,70	482,6		12	323,9	21,44	281,0	
24	609,6	14,27	581,1	14		355,6	23,82	308,0		
30	762,0	15,88	730,2	16		406,4	26,19	354,0		
40 (STD)	1/8	10,3	1,73	6,8		18	457,2	29,36	398,5	
	1/4	13,7	2,24	9,2		20	508,0	32,54	442,9	
	3/8	17,1	2,31	12,5	24	609,6	38,89	531,8		
	1/2	21,3	2,77	15,8	120	4	114,3	11,13	92,0	
	3/4	26,7	2,87	21,0		5	141,3	12,70	115,9	
	1	33,4	3,38	26,6		6	168,3	14,27	139,8	
	1 1/4	42,2	3,56	35,1		8	219,1	18,26	182,6	
	1 1/2	48,3	3,68	40,9		10	273,0	21,44	230,1	
	2	60,3	3,91	52,5		12	323,9	25,40	273,1	
	2 1/2	73,0	5,16	62,7		14	355,6	27,79	300,0	
	60	3	88,9	5,49	77,9	16	406,4	30,96	344,5	
		3 1/2	101,6	5,74	90,1	18	457,2	34,92	387,4	
		4	114,3	6,02	102,3	20	508,0	38,10	431,8	
		5	141,3	6,55	128,2	24	609,6	46,00	517,6	
		6	168,3	7,11	154,1	160	1/2	21,3	4,78	11,7
		8	219,1	8,18	202,7		3/4	26,7	5,56	15,6
		10	273,0	9,27	254,5		1	33,4	6,35	20,7
12		323,9	10,31	303,3	1 1/4		42,2	6,35	29,5	
14		355,6	11,13	333,3	1 1/2		48,3	7,14	34,0	
16		406,4	12,70	381,0	2		60,3	8,74	42,8	
18		457,2	14,27	428,7	2 1/2		73,0	9,52	54,0	
20	508,0	15,09	477,8	3	88,9		11,13	66,6		
24	609,6	17,48	574,6	4	114,3		13,49	87,3		
80	8	219,1	10,31	198,5	5		141,3	15,88	109,5	
	10	273,0	12,70	247,6	6		168,3	18,26	131,8	
	12	323,9	14,27	295,4	8	219,1	23,01	173,1		
	14	355,6	15,09	325,4	10	273,0	28,58	215,8		
	16	406,4	16,64	373,1	12	323,9	33,34	257,2		
	18	457,2	19,05	419,1	14	355,6	35,71	284,2		
	20	508,0	20,62	466,8	16	406,4	40,49	325,4		
80	24	609,6	24,61	560,4	18	457,2	45,24	366,7		
	1/8	10,3	2,41	5,5	20	508,0	50,01	408,0		
	1/4	13,7	3,02	7,7	24	609,6	59,54	490,5		
	3/8	17,1	3,20	10,7						
	1/2	21,3	3,73	13,8						

Fig 2

lo que hay. Las otras tienen que pedirla en una forma especial y no en una ferretería, sino que en una barraca especializada ¿cómo puedo ver eso?

40, está es la estándar, allá tenemos 80, etc. Y siguen más que eso. Tomemos una medida de 1" tiene un diámetro exterior de 33,4 acá tiene los mismos 33,4. El espesor 3,38...4,55. Por lo tanto qué tiene de distinto el diámetro interior, esto tiene 25,6 y esa 24,3 ¿Por qué me mantiene el diámetro interior y cambia el diámetro exterior? Si yo cambio el diámetro exterior las medidas tendrían que ser distintas de la *cédula* 30,40, etc.

En cambio uniones, válvulas todos los accesorios tendrían que ser especiales para cada *cédula*, en cambio con eso me permite que todas las *cédulas* tengan los mismos accesorios, si cambio el diámetro interior.

Si Uds. observan aquí dice 25,6 de una pulgada ¿cuánto es una pulgada? 25,4mm ¿dónde tiene una pulgada? Porque el diámetro interior tampoco representa una pulgada. Esto que está aquí se llama medida nominal, diámetro nominal, diámetro nominal 1", es el nombre porque no tiene ninguna pulgada y después uno le agrega... a y además *cédula* 40, entonces esta con esa... ¿Por qué no tiene una pulgada? Originalmente tenía una pulgada, pero a través de métodos de fabricación más modernos se podían ahorrar material, por lo tanto, había que disminuir el espesor de la pared. No se disminuyó el diámetro interno por lo que ya comentamos que todas las conexiones e interconexiones de distintas tuberías serían muy complicadas entonces se aumentó el diámetro interior, entonces la de 1" tiene 25,6, no 25,4 y eso va a suceder. Entonces hay un diámetro nominal y un diámetro exterior y un diámetro interior, en este caso 33,4mm y en el otro 25,6mm. Entonces cuando vean por ahí diámetro nominal tendrían que ver en las tablas a qué corresponde exactamente, pero uno dice "es más o menos una pulgada" ¿qué pasa? Que nosotros muchas veces usamos áreas, en el área está el diámetro al cuadrado, entonces una pequeña diferencia en el valor tiene un área bastante diferente ¿para qué decir si estuviera elevado a otra potencia mayor? Sería mayor la diferencia, no es tampoco y cuando uno calcula velocidades y está calculando pérdidas y quiere hacerlo con delicadeza tiene que usarse con el valor original, entonces esto es para tuberías de acero.

Si uno calculara en los usos normales el espesor de la cañería las medidas son delgadísimas, en general están bastante sobredimensionadas, pero por ejemplo, si uno va a mover agua caliente o vapor nunca usen menos de cédula 40, aunque por cálculo les salga menos de cédula 40, porque son fluidos peligrosos. Si está trabajando con presiones muy altas pasará a ser un 80, 100, 120.

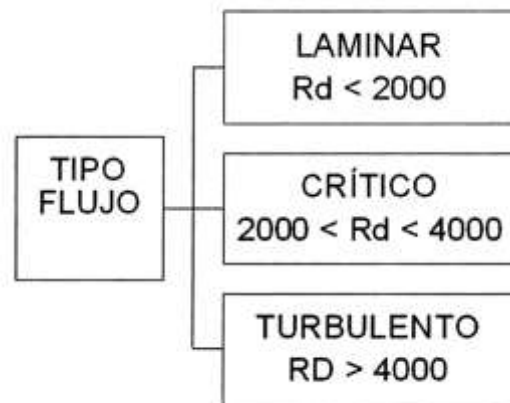


Fig 3

Esto es lo que hablábamos el otro día el número de Reynolds que es un parámetro dimensional (Fig 3) y que nos definía los flujos laminar, turbulentos, aquí que es el intermedio y eso nos indicaba ¿cómo era el perfil de velocidad? Y vamos a ver como aparte del perfil de velocidades tienen muchos otros detalles que son importantes saber en qué flujo nosotros tenemos.

Número de Reynolds:

$$Rd = \frac{VD\rho}{\mu}$$

V = velocidad

D = diámetro interior

ρ = densidad

μ = viscosidad dinámica

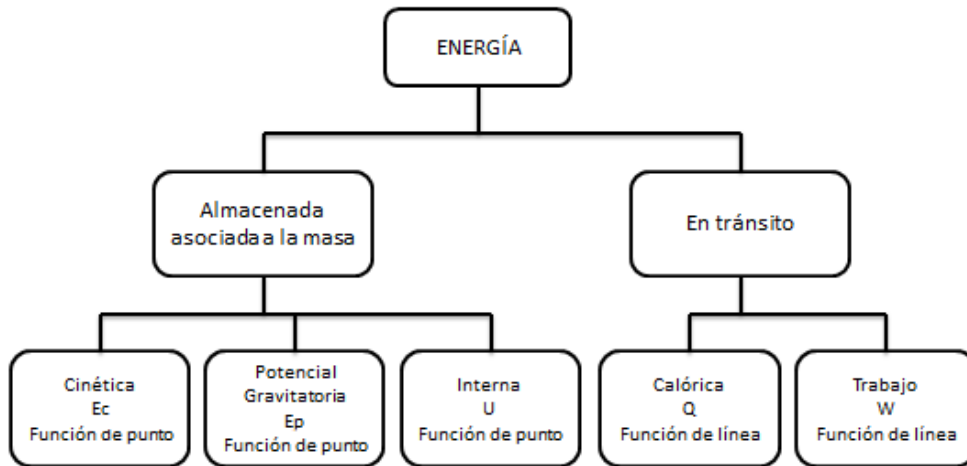


Fig 4

Esto también lo habíamos visto el otro día (Fig 4) que teníamos energía almacenada: cinética, potencial gravitatoria, interna y energía en tránsito: energía calórica y el trabajo en *el área en transe* y llegamos a una ecuación que era esta que la vimos el otro día, que nos dice que cada uno de estos términos me representaba energía por unidad de peso del fluido que está circulando, entonces como unidad de esto resultaba metros, pero son metros de columna del líquido, no es una longitud simple sino que es energía por unidad de peso de fluido circulante.

$$\frac{dQ}{gdm} - \frac{dW_m}{gdm} = \left(\frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + U_2 + \frac{P_2}{\gamma_2} \right) - \left(\frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + U_1 + \frac{P_1}{\gamma_1} \right) + h_{perd(1-2)}$$

Entonces teníamos el calor transferido, el trabajo realizado y acá la energía cinética potencial interna y de energía potencial de presión en el punto dos y los mismos términos en el punto 1, pero que el mover líquido por el interior de un ducto significa vencer resistencia, fricción, por un canal abierto también. Entonces tenemos este término acá que nos dice que son las pérdidas entre el punto 1 y el punto 2 en todo el camino, no una parte específica, en todo el camino, abarca todo el trayecto de lo que consideramos la consideración inicial y la consideración final.

Ahora esto lo podríamos simplificar si estamos trabajando con líquidos 1 y 2 (son prácticamente iguales), si no tenemos transferencia de calor podemos suprimir este término y el trabajo este mecánico lo podemos

colocar como aquí... mecánico que hace una bomba para mover líquido, o si fuera aire sería el trabajo que hace un ventilador o un tubo compresor para llevar aire de un lugar a otro, ahí está la misma expresión.

$$\frac{dW_m}{gdm} = H = \left(\frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + \frac{P_2}{\gamma_2} \right) - \left(\frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + \frac{P_1}{\gamma_1} \right) + h_{perd(1-2)}$$

Readecuando la expresión:

$$H = \left(\frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + \frac{P_2}{\gamma_2} \right) - \left(\frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + \frac{P_1}{\gamma_1} \right) + h_{perd(1-2)} \quad [m_{de\ columna\ de\ fluido}]$$

Esta energía que suministré al líquido para arreglar todas estas cosas para vencer la diferencia de nivel, para vencer diferencia de velocidad o diferencias de presión y la resistencia, aquí hay que agregarle Z también.

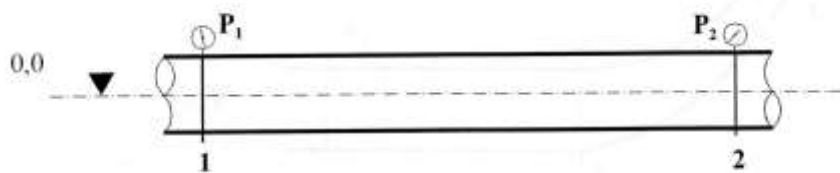


Fig 5

Después estuvimos viendo las pérdidas y lo primero que vimos fue la altura de referencia. Habíamos visto esto y decíamos que la presión P1 era mayor que la presión P2, por lo tanto ¿qué pasaba con la energía? Si esa era una tubería horizontal (Fig 5) vale decir $Z_1 = Z_2$, el diámetro se mantenía constante $B_1=B_2$, entonces ¿qué pasa si las presiones son diferentes? Si son diferentes significa que aquí tenemos roce (la diferencia se produce porque hay roce en la tubería), esa pérdida que hemos llamado ahí.

$$\frac{P_2 - P_1}{\gamma_{agua}} = h_{perd} \quad [m_{ca}]$$

Si no hubieran pérdidas tendrían que ser iguales las presiones y en la anterior teníamos una pérdida solamente en una tubería horizontal de

sección *constante* y recto, pero también tenemos otros casos, tubería recta, un codo que disminuye sección otro trozo de tubería recta y a lo más cambiamos de posición.

Considerando una condición general:

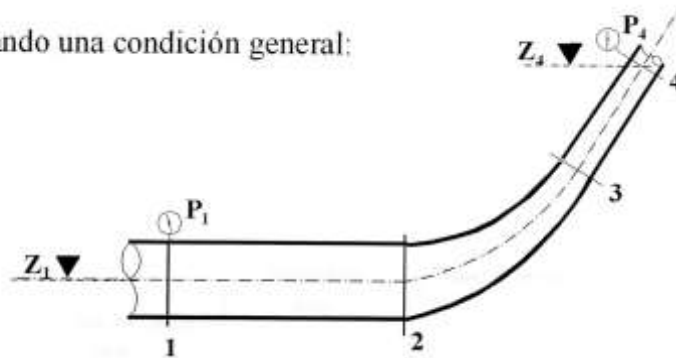


Fig 6

$$Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + u_1 = Z_4 + \frac{V_4^2}{2g} + \frac{P_4}{\gamma} + u_4 + h_{per(1-4)}$$

El cambio de presión para vencer la resistencia permite variar la altura y la velocidad

$$P_1 - P_4 = \gamma \left[(Z_4 - Z_1) + \left(\frac{V_4^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right) \right] + \gamma h_{per(1-4)}$$

Entonces al plantear esta ecuación el nivel de esto con respecto a una referencia muchas veces uno toma Z_1 como 0 porque es más fácil, pero puede ser otra referencia, la referencia puede estar acá (Fig 6). La referencia podría estar ahí está el valor de 00 y tengo un valor de Z_1 con respecto a este. Entonces Z_1 es el nivel que tiene esto. $\frac{V_1^2}{2g}$ es la energía cinética de la velocidad de la entrada, la presión en la entrada, la energía interna el Z_4 que era ya al final, la velocidad al final, la presión al final un 4 al final, ya sabemos que hay una pérdida entre 1 y 4 por roce, pero si apreciamos estas que son muy parecidas, nos queda lo que tenemos aquí abajo. Entonces la diferencia de presión que se establece aún, ahora de 1-4 no sirve, no solo para vencer la resistencia que tenga la tubería, sino que para elevar el líquido o el fluido y cambiarle la velocidad, entonces la presión en la transparencia anterior nos servía solamente para vencer la resistencia. Aquí vemos que la presión nos sirve para vencer la resistencia, pero aparte de eso para ganar energía potencial gravitatoria y para ganar o cambiar la energía cinética, aquí en este caso

aumenta la energía cinética porque al disminuirse el diámetro del ducto aumenta la velocidad. Por eso a este término de aquí al P/2 le llaman energía potencia de presión porque es como una reserva de energía que yo tengo ahí almacenada y que la puedo usar en distintas cosas.

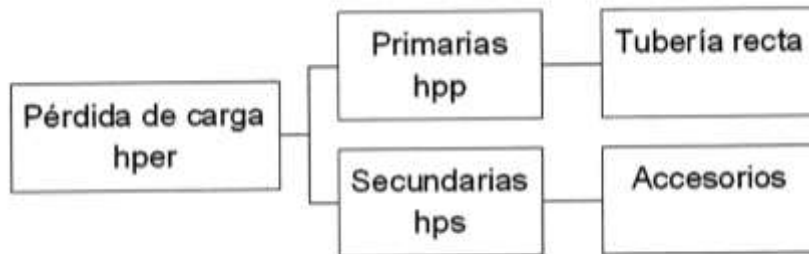


Fig 7

Este también lo habíamos visto (Fig 7), las pérdidas de carga en la figura anterior que decía en primera que le llamábamos a la tubería recta y en segunda o secundaria todos los accesorios (un codo una T o una válvula, incluso un termómetro que vaya colocado en una tubería produce una pérdida de carga adicional, cualquier cosa extraña que no sea tubería recta). Aquí yo lo había señalado.

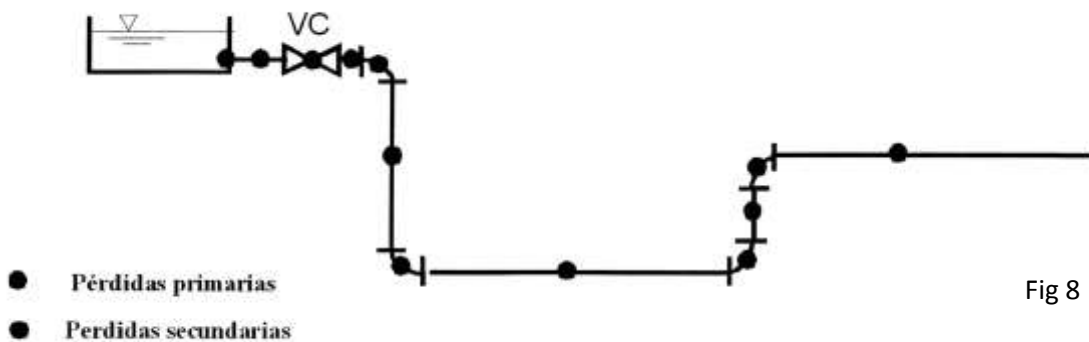


Fig 8

Pérdida primaria. La primera es en la entrada cómo está conectada la tubería al estanque (Fig 8). Después tenemos la válvula de la compuerta y después los 4 codos es pérdida secundaria. Las sumas de las pérdidas primarias más las secundarias nos dan la pérdida total.

$$h_{per(1-2)} = \sum K_1 \frac{V^2}{2g} + f \frac{\sum_j L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

¿Cómo se calculan esas pérdidas? A través de estas formas: para cada uno de estos elementos de las pérdidas secundarias tenemos un valor K, entonces sumamos en este caso como es una tubería que tiene un solo diámetro, sumamos el K de la entrada, más el K de la válvula, más el K del codo multiplicado por 4 y tendríamos la suma de K. Eso lo multiplicamos por la velocidad al cuadrado partido por dos. Aquí vuelve a tomar importancia eso que yo dije hace un momento: la velocidad es igual al caudal partido por el área, si es un tubo circular es $\frac{1}{4}$ y V^2 . Así que si yo tengo V^2 es: V^2 , el volumen al cuadrado, el flujo volumétrico / por $\frac{1}{4}$ y la... al cuadrado y B a la cuarta, por eso cuando varía un poco el diámetro interior de la tubería me varía mucho la velocidad, porque está elevado a la 4 potencia, y de ahí la importancia uno sabe el diámetro nominal, pero es bueno para calcular bien las velocidades de qué diámetro interno real tiene esa tubería.

Preguntas referidas a la ecuación anterior:

De ese diámetro, ¿estás hablando del diámetro interno?

Interno, por donde pasa.

¿Qué señala V^2/K ?

La energía cinética. La velocidad al cuadrado partido por dos veces la aceleración de gravedad del lugar en que esté.

El otro término la tubería recta, sumamos todos los trozos de tubería, lo dividimos por el diámetro y nuevamente lo multiplicamos por $V^2 \times 12$ y además un valor f (este se llama factor de fricción). Aquí eso ya vimos que la velocidad tiene una gran incidencia y nosotros lo podemos ver, si uno se soba las manos así no se las entibia nunca ¿qué hace? Hace así para tener mayor fricción, entonces ahí tiene que ver la velocidad con el calor general, por lo tanto con la energía consumida.

Ahora, si yo tengo una tubería de 1 mt., naturalmente no es lo mismo la tubería de 1 mt que una tubería que tenga 100mt., así que es claro que la pérdida tiene que ser directamente proporcional a la longitud de la tubería.

¿Qué señala esa J?

La J significa el pedazo de una, el pedazo de otra, el pedazo de otra. Mientras más larga la tubería mayor es la pérdida, pero está diluido por el diámetro, no es lo mismo que esté pasando el flujo por un gran diámetro a que ese mismo flujo pase por un diámetro pequeño. Mientras mayor es el diámetro de la tubería, menor es la pérdida. Inversamente proporcional, crece el diámetro disminuye la pérdida, es la misma proporción que ... hay que tener cuidado crece el diámetro y cambia la $\frac{1}{4}$ disminuye la velocidad es un efecto multiplicador, podríamos decir que tomando esto y eso nos queda el diámetro de aquí, porque si yo reemplazo aquí B^2 por eso, esto me queda aquí en el denominador, me queda el diámetro por aquí, así que el diámetro de la tubería tiene una influencia elemental en las pérdidas que se produzcan en el interior de la misma. Ahora eso mismo uno lo podría trasladar a otro tipo de pérdida. El roce.

Bueno, aquí está el caso de la pérdida primaria.

$$h_{pp} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

F es factor de fricción, D= diámetro de la tubería, L= longitud de la tubería, V= velocidad de fluido, está todo dentro de metros por segundos, este es adimensional. Esto es para un ducto de sección circular, pero nosotros podemos tener un ducto de sección no circular. Entonces vamos a tener que usar esto que está aquí, ya se los voy a explicar en una de las diapositivas.



Fig 9

El factor de fricción: F, depende de dos cosas (fig 9): en primer lugar del número de Reynolds; Es decir el factor de fricción depende nuevamente de la velocidad, del diámetro, de la densidad y de la viscosidad del fluido.

Mientras más viscoso el fluido si no tuviéramos arriba una constante el número de Reynolds disminuye. Mientras menos viscoso, crece el número de Reynolds y vamos a ver cómo influye. Lo otro punto importante es la rugosidad relativa (e/D) ¿qué es la rugosidad relativa? nosotros dentro de la cañería si la miráramos en corte diríamos que hay colinas, valles, etc. Esto viene a ser la rugosidad. Esa rugosidad se toma la altura que tiene, la altura media que tiene esto, esto viene a ser el E , la altura que tiene es la altura media se saca un valor promedio de Reynolds (es un valor promedio) ¿Eso de qué depende? ¿Del material? –No- depende del proceso de fabricación. Si tengo una tubería de cobre estirada, una de aluminio, una de PVC; tengo la misma rugosidad porque tiene el mismo proceso de fabricación ¡A! si es de acero galvanizado tiene otra rugosidad, si es de acero de fierro negro tiene otra rugosidad porque tiene otro proceso de fabricación. La de fierro negro, ¿cómo se construye normalmente? Es una plancha que se dobla, se une y se suelda, pero la plancha por el proceso de laminado que llega originalmente es súper lisa, entonces va a tener una velocidad muy pequeña 0,046 ¡A! y la de acero galvanizado, sí se hizo igual, pero después se galvanizó, se metió en un baño y ahora la voy a galvanizar y eso le produjo una rugosidad distinta 0,152 (3 veces app) A pesar de que originalmente es del mismo material, pero el proceso de fabricación cambia. Entonces las tuberías su rugosidad depende de cómo se fabricaron. Mientras más rugosa más roza, eso no hay que conversarlo lo hemos experimentado muchas veces en cualquier cosa, si tenemos baldosas que son muy lisas es muy resbalosa porque poco roza, entonces qué hacemos, en lo posible usar un cerámico, o sea más rugoso, entonces este factor de fricción depende de estas dos cosas, pero ahora el problema es relacionarlos. Muchas veces se dan trabajos que son bárbaros.

Primero este factor F (Fig 10) vamos a ver qué tenemos una primera zona cuando el flujo es laminar, entonces lo voy a mostrar, cuando el flujo es laminar quiere decir que el número de Reynolds es menor de 2.000, en ese caso el factor de fricción tiene un valor que es $64/$ por el número de Reynolds y la rugosidad, aquí la rugosidad no interviene, la rugosidad y aquí cuando el número de Reynolds es bajo, qué significa, que tengo una baja velocidad, o una muy alta viscosidad, la cosa es que la combinación

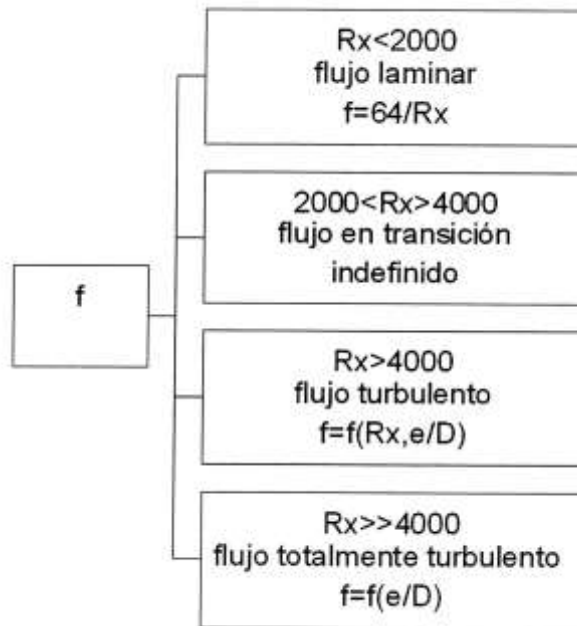


Fig 10

de todos estos valores es menor que esa ¿Qué significa? Que el líquido que está escurriendo por aquí, por sobre esto llena esto y pavimenta y el fluido se está moviendo de aquí hacia arriba, aquí tengo una velocidad, pero aquí la velocidad es 0, entonces el mismo líquido o el mismo fluido me pavimentó el camino y sobre ese se desliza el flujo principal, entonces la rugosidad quedó extendida bajo esa capa que está en reposo, por eso ahí no tiene ninguna importancia, pero cuando voy aumentando el número de Reynolds empiezan a aparecer los extremos de estos, ahí y ahí hasta que llego abajo. Entonces ¿qué pasa? Cuando es mayor de 4.000 el flujo *turbulento*, ahí significa que empezaron a sumar los extremos de los *montes* y cada vez más, entonces mayor de 4.000 flujo turbulento depende tanto del número de Reynolds como de la rugosidad relativa. La rugosidad relativa ¿qué significa eso? ¿Qué relación hay entre la altura de esa imperfección y el diámetro del tubo porque si yo tengo un tubo delgadito una imperfección es muy importante 0,046mm es bastante poco, pero en un tubo que tiene 2mm de diámetro es un porcentaje muy alto, pero si yo tengo un ducto que tiene 3m de diámetro los 0,046 son muy chiquititos comparado al diámetro del tubo, por eso aquí se habla de rugosidad relativa ¿Qué importancia tiene la rugosidad con respecto a la con diámetro? Yo podría decir ¡oiga fíjese que en la medición que estoy haciendo tengo un error de un mt! ¿Es un error muy grande? Un mt en error, depende ¿Qué estoy midiendo? –estoy midiendo de aquí al solnada ¡A! pero estoy midiendo el largo de la mesa o de la pieza es mucho,

entonces cuando uno ve errores primero busca el valor absoluto que sería el metro y después el error relativo a lo que estoy midiendo. Ese error relativo me da la importancia que tiene esa diferencia de medida.

Acá entonces igual esto me da este error relativo, este la rugosidad relativa me da la importancia que tiene es rugosidad con respecto al flujo, entonces tenemos una zona, esta me influye la rugosidad, acá si influye la rugosidad y si este es mucho mayor de 4.000 un flujo que vamos a llamar total de turbulento, ya el número de Reynolds no tiene ninguna importancia solamente la rugosidad relativa. Así que en un extremo tengo el factor de fricción no depende de la rugosidad relativa, otro extremo en que depende solo de la rugosidad relativa y en la parte central depende de la rugosidad relativa o del número de Reynolds.

Aquí en la zona de transición no sabemos lo que pasa. Entonces cuando uno cae en ese juego, uno dice ¿Qué es lo más desfavorable para lo que estoy calculando? Y tomo esa opción, si es laminar la más desfavorable tomo la laminar, si es turbulento, tomo turbulento, porque no hay seguridad de lo que está sucediendo.

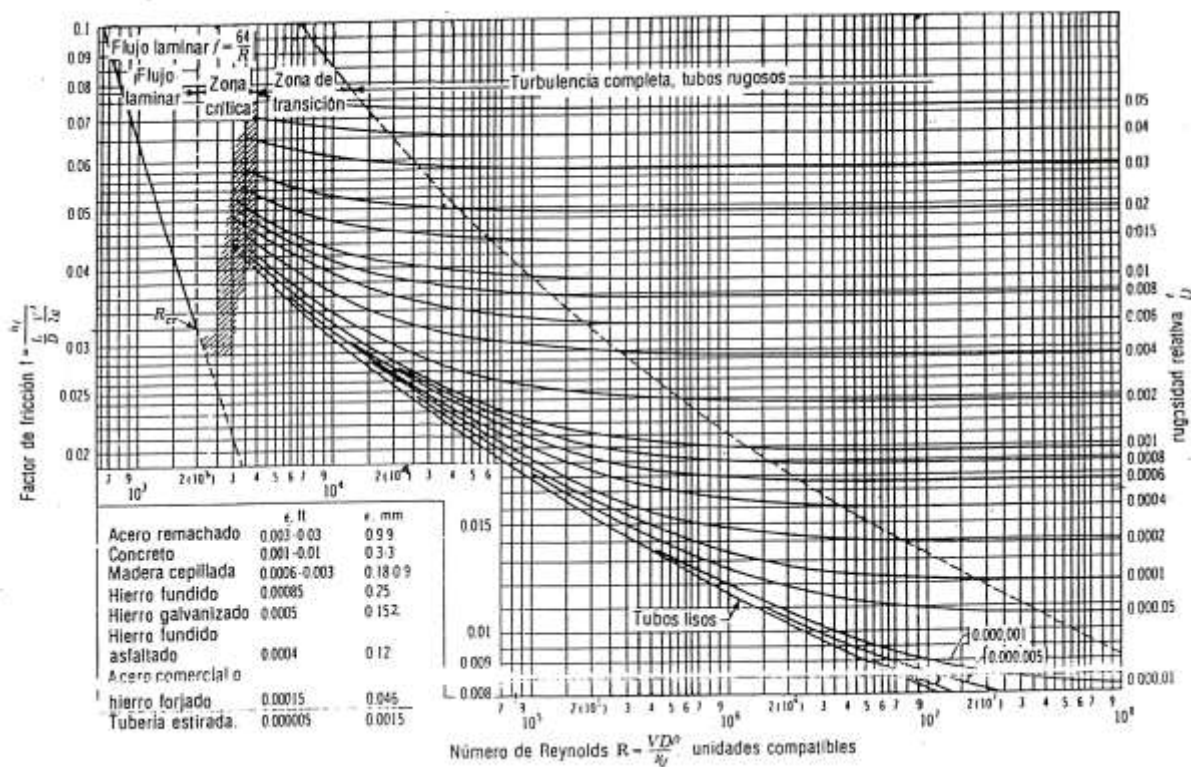


Fig 11

Aquí está el gráfico. Este fue el Sr. Moody, que se dio el trabajo, este es el gráfico de Moody (Fig 11). Se dio el trabajo de tomar cañerías comerciales y medir las pérdidas para distintos números de Reynolds, aquí en el denominador (abajo) está el número de Reynolds. Acá en la ordenada (izquierda) tenemos este factor de fricción f . Número de Reynolds, el factor de fricción resultante y acá la rugosidad relativa (derecha). Entonces yo día cuando el número de Reynolds es inferior a 2.000, resulta que el número de Reynolds es... disculpen faltó el número de fricción, fricción es $64/\text{por el número de Reynolds}$, eso representa una regla $64/\text{Número de Reynolds}$, y la rugosidad aquí estaba cubierta por un mismo fluido de tal manera que no tiene ninguna importancia, de 2.000 a 4.000 no sabemos qué pasa, por eso esta línea sigue punteada hacia acá y acá está achurada y aquí tenemos una primera parte que podríamos decir que limita con esta línea que podríamos decir que es un flujo turbulento, aquí lo llamo zona de transición, pero a mí no me gusta porque es un flujo turbulento, lo que cambia aquí es que aquí es turbulento y aquí es súper turbulento. Bueno en esta zona depende tanto del número de Reynolds como de la rugosidad relativa, todos eso son rugosidad relativa e/D entonces 0,02 0,01, etc., entonces si yo quiero calcular el factor de fricción, con mi valor aquí, por ejemplo 0,02 voy por el número de Reynolds que corresponde supongamos que es ese y me voy hacia arriba a esta línea, ahí se cortan y de aquí saco y leo el valor. Entonces el gráfico de Moody permite relacionar los tres factores influyentes en las pérdidas de carga: N° de Reynolds, factor de fricción y rugosidad relativa.

Las pérdidas secundarias, como se había dicho, corresponden a todos los accesorios y elementos vinculantes entre tuberías (ver Fig 8), y la fórmula para calcular las pérdidas de carga secundarias, es la siguiente:

$$h_{ps} = K \frac{V^2}{2} = f \frac{L_{equivalente}}{D} \frac{V^2}{2}$$

Aquí “K” corresponde a una constante o coeficiente de pérdida de cada elemento y son valores obtenidos desde tabla (Fig 12), “f” corresponde al factor de fricción y al igual que la “k”, son valores a-dimensionales. “D”

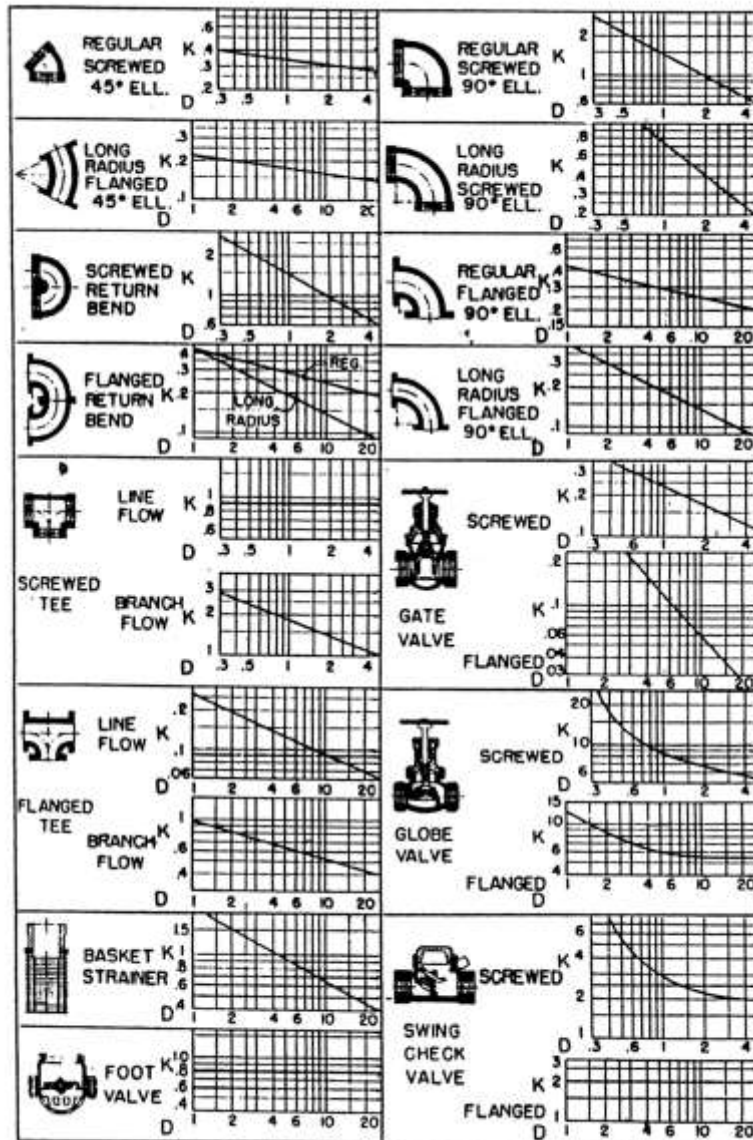


Fig 12

corresponde al diámetro interno de la tubería o accesorio y se mide en metros, para el caso en que el ducto no sea circular, el diámetro corresponde a 4 veces el Radio hidráulico; $L_{equivalente}$, longitud equivalente, es la longitud de tubería recta que produce una pérdida de carga equivalente del accesorio en metros y por último V que indica la velocidad a la que se desplaza el fluido en metros partido por segundo.

El radio hidráulico se ocupa para ductos no ideales, es decir: no circulares o no llenos, y se calcula dividiendo el área mojada de la sección del ducto, por el perímetro de la sección mojada del ducto. Su valor se reemplaza

por el del diámetro en la fórmula que permite calcular las pérdidas de carga secundarias.

$$Rh = \frac{\frac{1}{4} \pi \cdot D^2}{\pi \cdot D} = \frac{1}{4} D$$

En el caso de un área circular llena, como es el caso de los ductos ideales, el valor que se obtiene es $\frac{1}{4}$ del diámetro, que se cuadruplica al entrar a la fórmula de las pérdidas secundarias para simplificarse en "D".

$$h_{ps} = K \frac{V^2}{2} = f \frac{L_{equivalente}}{D} \frac{V^2}{2}$$

Entonces, si simplificamos de esta fórmula las velocidades al cuadrado partidas por dos, obtenemos:

$$K = f \frac{L_{equivalente}}{D}$$

Otra forma de calcular la pérdida de carga secundaria es la fórmula de Hazen-Williams, pero esta se ocupa principalmente para tuberías de PVC. Aquí se ocupa un valor "J" que depende a su vez del caudal y del diámetro. Y este valor se multiplica luego por las longitudes equivalentes partidas en cien.

$$J = 9,95 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{Q^{1,852}}{D^{4,869}}$$

J = pérdida de carga en [m por cada 100 m] de tubería recta
















Q = caudal en [m³/s]

D = diámetro interior en [m]

$$h_{ps} = \frac{J \cdot L_{Equivalente}}{100}$$

$L_{equivalente}$ = Longitud de tubería recta que provoca igual pérdida de carga que el accesorio, sus valores se obtienen desde una tabla (Fig 13).

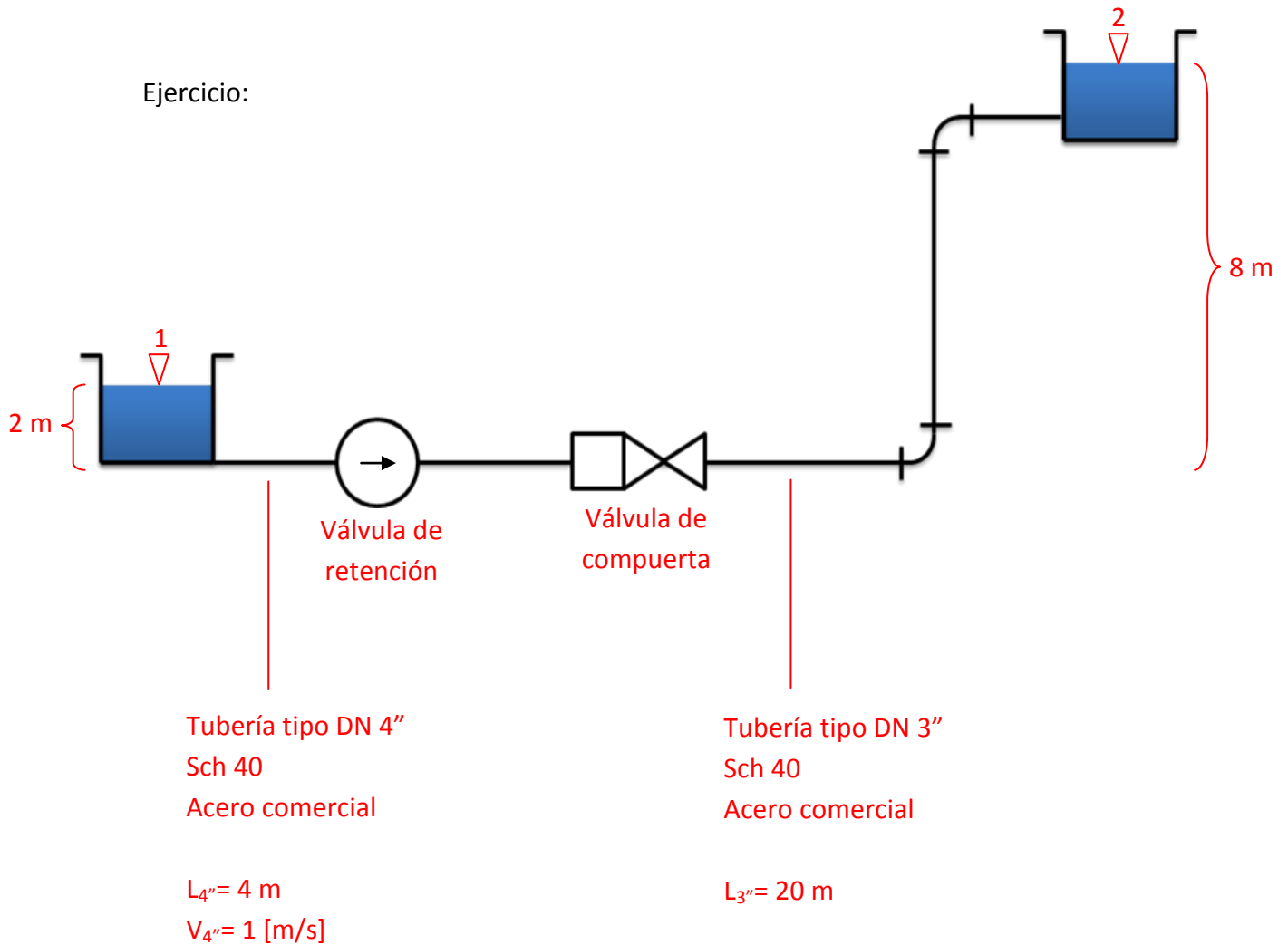
TABLE 34 FRICTION HEAD LOSS FOR WATER

FITTINGS			PIPE SIZE																				
			1/4	1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	24	
	SCREWED	STEEL C.I.	2.3	3.1	3.6	4.4	5.2	6.6	7.4	8.5	9.3	11	13	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	FLANGED	STEEL C.I.	.....	.....	.92	1.2	1.6	2.1	2.4	3.1	3.6	4.4	5.9	7.3	8.9	12	14	17	18	21	23	25	30
	SCREWED	STEEL C.I.	1.5	2.0	2.2	2.3	2.7	3.2	3.4	3.6	3.6	4.0	4.6	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	FLANGED	STEEL C.I.	.....	.....	1.1	1.3	1.6	2.0	2.3	2.7	2.9	3.4	4.2	5.0	5.7	7.0	8.0	9.0	9.4	10	11	12	14
	SCREWED	STEEL C.I.	.34	.52	.71	.92	1.3	1.7	2.1	2.7	3.2	4.0	5.5	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	FLANGED	STEEL C.I.	.....	.....	.45	.59	.81	1.1	1.3	1.7	2.0	2.6	3.5	4.5	5.6	7.7	9.0	11	13	15	16	18	22
	SCREWED	STEEL C.I.	.79	1.2	1.7	2.4	3.2	4.6	5.6	7.7	9.3	12	17	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	FLANGED	STEEL C.I.	.....	.....	.69	.82	1.0	1.3	1.5	1.8	1.9	2.2	2.8	3.3	3.8	4.7	5.2	6.0	6.4	7.2	7.6	8.2	9.6
	SCREWED	STEEL C.I.	2.4	3.5	4.2	5.3	6.6	8.7	9.9	12	13	17	21	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	FLANGED	STEEL C.I.	.....	.....	2.0	2.6	3.3	4.4	5.2	6.6	7.5	9.4	12	15	18	24	30	34	37	43	47	52	62
	SCREWED	STEEL C.I.	2.3	3.1	3.6	4.4	5.2	6.6	7.4	8.5	9.3	11	13	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	REG. FLANGED	STEEL C.I.	.....	.....	.92	1.2	1.6	2.1	2.4	3.1	3.6	4.4	5.9	7.3	8.9	12	14	17	19	21	23	25	30
	LONG RAD FLANGED	STEEL C.I.	.....	.....	1.1	1.3	1.6	2.0	2.3	2.7	2.9	3.4	4.2	5.0	5.7	7.0	8.0	9.0	9.4	10	11	12	14
	SCREWED	STEEL C.I.	21	22	22	24	29	37	42	54	62	79	110	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	FLANGED	STEEL C.I.	.....	.....	38	40	45	54	59	70	77	94	120	150	190	260	310	390	.....	.....	.....	.....	.....
	SCREWED	STEEL C.I.	.32	.45	.56	.67	.84	1.1	1.2	1.5	1.7	1.9	2.5	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	FLANGED	STEEL C.I.	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	2.6	2.7	2.8	2.9	3.1	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
	SCREWED	STEEL C.I.	12.8	15	15	15	17	18	18	18	18	18	18	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	FLANGED	STEEL C.I.	.....	.....	15	15	17	18	18	21	22	28	38	50	63	90	120	140	160	190	210	240	300
	SCREWED	STEEL C.I.	7.2	7.3	8.0	8.8	11	13	15	19	22	27	38	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	FLANGED	STEEL C.I.	.....	.....	3.8	5.3	7.2	10	12	17	21	27	38	50	63	90	120	140	.....	.....	.....	.....	.....
COUPLING OR UNION	SCREWED	STEEL C.I.	.14	.18	.21	.24	.29	.36	.39	.45	.47	.53	.65	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	SCREWED	STEEL C.I.	.04	.07	.10	.13	.16	.26	.31	.43	.52	.67	.95	1.3	1.6	2.3	2.9	3.5	4.0	4.7	5.3	6.1	7.6
	FLANGED	STEEL C.I.	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	SCREWED	STEEL C.I.	.44	.68	.96	1.3	1.8	2.6	3.1	4.3	5.2	6.7	9.5	13	16	23	29	35	40	47	53	61	76
	FLANGED	STEEL C.I.	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	SCREWED	STEEL C.I.	.88	1.4	1.9	2.6	3.6	5.1	6.2	8.5	10	13	19	25	32	45	58	70	80	95	110	120	150
	FLANGED	STEEL C.I.	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	SCREWED	STEEL C.I.	4.6	5.0	5.6	7.7	18	20	27	29	34	42	53	61	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	SCREWED	STEEL C.I.	$h = \frac{V_1 - V_2}{2g}$ FEET OF LIQUID; IF $V_2 = 0$ $h = \frac{V_1^2}{2g}$ FEET OF LIQUID																				

Reprinted from the STANDARDS OF THE HYDRAULIC INSTITUTE, Eleventh Edition. Copyright 1955 by the Hydraulic Institute, 122 East 42nd Street, New York, New York 10017.

Fig 12

Ejercicio:



Para este caso, consideramos:

$$\text{Presión pluviométrica}_1 = 0$$

$$P_2 = 0$$

$$V_1 \approx 0$$

$$V_2 \approx 0$$

(Las velocidades se miden en los puntos 1 y 2, donde el fluido se encuentra en reposo)

$$Z_1 = 2 \text{ [m]}$$

$$Z_2 = 8 \text{ [m]}$$

Principio de la termodinámica:

$$Z_1 + \cancel{\frac{V_1^2}{2g}} + \cancel{U_1} + \cancel{\frac{P_1}{\gamma}} + H = Z_2 + \cancel{\frac{V_2^2}{2g}} + \cancel{U_2} + \cancel{\frac{P_2}{\gamma}} + h_{p\ 1-2}$$

Las energías internas (U) no se consideran pues no existe un cambio de temperatura considerable en el agua en tránsito.

H = Trabajo mecánico requerido o realizado.

Sacando los términos iguales a cero:

$$H = Z_2 - Z_1 + h_{p\ 1-2}$$

Para empezar, calculamos las pérdidas:

$$h_{p\ 1-2} = \text{Pérdidas secundarias ducto } L_{4''} + \text{Pérdidas primarias ducto } L_{4''} + \text{Pérdidas secundarias ducto } L_{3''} + \text{Pérdidas primarias ducto } L_{3''}$$

$$(k_{salida}) \frac{V_{4''}^2}{2g} + f_{4''} \frac{L_{4''}}{D_{4''}} \cdot \frac{V_{4''}^2}{2g} + (k_{valv.ret} + k_{valv.comp} + 2k_{codos} + k_{entrada\ est}) \frac{V_{3''}^2}{2g} + f_{3''} \frac{L_{3''}}{D_{3''}} \cdot \frac{V_{3''}^2}{2g}$$

Para obtener los valores de $f_{3''}$ y $f_{4''}$ se calcula el número de Reynolds:

$$Rd_{D_{4''}} = \frac{V_{4''} D_{4''} \rho}{\mu}$$

$$Rd_{D_{3''}} = \frac{V_{3''} D_{3''} \rho}{\mu}$$

$$V_{4''} = 1 \text{ [m/s]}$$

$$V_{3''} = ? \text{ [m/s]}$$

$$D_{4''} = 102,3 \text{ [mm]}$$

$$D_{3''} = 77,9 \text{ [mm]}$$

$$\rho = 998,2 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\rho = 998,2 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\mu = 0,001002 \text{ [Nws/m}^2\text{]}$$

$$\mu = 0,001002 \text{ [Nws/m}^2\text{]}$$

Cálculo de la Velocidad en el ducto de 3'' mediante el principio de conservación del flujo másico:

$$V_{3''} \cdot A_{3''} = V_{4''} \cdot A_{4''}$$

$$V_{3''} = V_{4''} \cdot \frac{A_{4''}}{A_{3''}}$$

$$V_{3''} = V_{4''} \cdot \left(\frac{D_{4''}}{D_{3''}} \right)^2$$

$$V_{3''} = 1 \cdot \left(\frac{102,3}{77,9} \right)^2$$

$$V_{3''} = 1,72 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Reemplazando los valores y desarrollando las ecuaciones, se obtiene:

$$Rd_{D4''} = 1,02 \cdot 10^5 [-]$$

$$Rd_{D3''} = 1,33 \cdot 10^5 [-]$$

Se saca el valor de rugosidad relativa (e/D) para, junto al número de Reynolds, obtener el valor del factor de fricción en la tabla de Moody (Fig 12).

$$\frac{e}{D_{4''}} = \frac{0,046}{102,3}$$

$$\frac{e}{D_{3''}} = \frac{0,046}{77,9}$$

$$\frac{e}{D_{4''}} = 0,00045 [-]$$

$$\frac{e}{D_{3''}} = 0,00059 [-]$$

$$f_{4''} = 0,0202$$

$$f_{3''} = 0,02$$

Retomando la ecuación principal:

$$(k_{salida}) \frac{V_4''^2}{2g} + f_{4''} \frac{L_{4''}}{D_{4''}} \cdot \frac{V_4''^2}{2g} + (k_{valv.ret} + k_{valv.comp} + 2k_{codos} + k_{entrada est}) \frac{V_3''^2}{2g} + f_{3''} \frac{L_{3''}}{D_{3''}} \cdot \frac{V_3''^2}{2g}$$

Valores obtenidos por tabla:

K salida del primer estanque =	0,5
K valvula de retención =	2
K valvula de compuerta =	0,23
K de los codos =	0,33
K de la entrada al segundo estanque =	1

$$h_{p1-2} = \left(0,5 + \frac{0,0202 \cdot 4}{0,1023}\right) \frac{1^2}{2 \cdot 9,81} + \left(2 + 0,23 + 2 \cdot 0,33 + 1 + \frac{0,02 \cdot 20}{0,0779}\right) \frac{1,72^2}{2 \cdot 9,81}$$

Como resultado, tenemos la pérdida de carga h_{p1-2} :

$$h_{p1-2} = 1,27 [m_{columna de agua}]$$

Con el cálculo de las pérdidas, podemos calcular el trabajo mecánico realizado:

$$H = Z_2 - Z_1 + h_{p1-2}$$

$$H = (8 - 2) + 1,27$$

$$H = 7,27 [m_{columna de agua}]$$

Para calcular la potencia hidráulica requerida (N_h), se calcula:

∇ = caudal

$$N_h = H \cdot \nabla \cdot \gamma$$

$$\nabla = V_{4''} \cdot A_{4''}$$

$$N_h = 7,27 \cdot 8,21 \cdot 998,2 \cdot 10^{-3}$$

$$\nabla = 8,21 \cdot 10^{-3} \left[\frac{m}{s^3} \right]$$

$$N_h = 585,14 [Watt]$$

La potencia específica que debe entregar la Bomba (N_b):

$$N_b = \frac{N_h}{\text{Rendimiento de la bomba}}$$

$$N_b = \frac{585,14}{0,65}$$

$$N_b = 900,2 [W] = 0,9 [kW]$$