

ÍNDICE

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

CAPITULO II

CONVERSIÓN DE UNIDADES Y ANÁLISIS DIMENSIONAL

CAPITULO III

CONCEPTOS FUNDAMENTALES

CAPITULO IV

POZOS FLUYENTES

CAPITULO V

BOMBEO NEUMÁTICO

CAPITULO VI

BOMBEO HIDRÁULICO TIPO PISTÓN

CAPITULO VII

BOMBEO HIDRÁULICO TIPO JET (A CHORRO)

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

En la industria petrolera, la explotación de los pozos es de suma importancia ya que ellos representan el medio de obtención de hidrocarburos desde el yacimiento petrolífero a la superficie, lo cual reviste a su vez un interés de aspecto económico para el país.

Por lo anterior, existe una preocupación de los ingenieros petroleros por lo que la producción de dichos pozos se efectúe en forma óptima; es decir, que el pozo produzca a un gasto tal que la vida productiva de éste sea lo más prolongada posible, claro está que sin dejar de importar el aspecto económico.

Además debe tenerse en cuenta que se debe producir todo el volumen posible de hidrocarburos de los pozos, esto es, que el volumen de aceite remanente final sea el menor posible.

De esta manera los sistemas artificiales de producción en pozos petroleros, tienen una gran importancia en la explotación de los hidrocarburos sin el empleo de estos sistemas de extracción de hidrocarburos, no sería factible obtener el máximo beneficio del yacimiento.

Cabe mencionar que el empleo de un sistema de bombeo o extracción, incrementa el costo de la explotación del yacimiento, pero por otro lado si este costo es mucho menor al beneficio obtenido del fluido extraído, no solo se cubrirá la inversión sino a su vez se tendrán ganancias adicionales.

El siguiente trabajo tiene como objetivos primordiales analizar desde el pozo fluyente hasta los sistemas artificiales de producción (en este caso: bombeo neumático continuo e intermitente, bombeo hidráulico tipo pistón y jet o a chorro), para dar un amplio panorama en la solución a problemas prácticos de optimización de la producción de pozos petroleros.

Además se anexan dos capítulos que contemplan antecedentes necesarios para el mejor aprovechamiento de los problemas. Estos son:

Capítulo II, que trata sobre conversión de unidades y análisis dimensional, tan indispensable no sólo en la industria petrolera sino en otras áreas de la ingeniería como una herramienta para facilitar la solución a problemas afines.

Capítulo III, sobre conceptos fundamentales, ya que como es sabido, cualquier materia que se desee estudiar, sino se tienen antecedentes sobre ésta, resulta ser más complicado su estudio.

Algunos de los capítulos presentan glosario de términos para poder complementar el estudio de la producción de pozos y tener un conocimiento más amplio sobre el tema en cuestión.

En otros capítulos se anexan gráficas y tablas que serán de utilidad en la solución de todos los problemas ahí descritos.

Al final de cada capítulo se anexan las figuras que sirven como base en la solución a los problemas resueltos, todas éstas están señaladas con el número del capítulo correspondiente.

Cabe aclarar que para el capítulo V de bombeo neumático, se emplearon curvas de gradiente de presión de flujo multifásico en tuberías verticales y horizontales, las cuales pueden encontrarse en la referencia (2) de dicho capítulo y están referenciadas con Fig. A - No. Y B - No.

En los capítulos VI y VII de bombeo hidráulico tipo pistón y jet (a chorro), todas las Figuras y Tablas a las que se hacen mención en la solución de los problemas, se encuentran en la referencia (1) de este

En todos los capítulos se presentan las referencias que se utilizarán para elaborar este trabajo para que el lector pueda profundizar sobre algún tema de su interés.

Además debe mencionarse que las figuras elaboradas para la solución de los problemas resueltos se denotan durante el desarrollo de éstos como sigue:

Número del problema correspondiente, Figura (A,B,C,etc.). Número del capítulo respectivo y R (problema resuelto) ejemplo: Fig. 3A. IVR.

Asimismo se les recomienda a los usuarios de estos apuntes que las definiciones que no estén claras en los glosarios que se incluyen al final de cada capítulo consulten el "A Dictionary of - Petroleum Terms" Edited by Jodie Leecraft, published by Petroleum Extension Service, The University of Texas at Austin.

Por otra parte se les agradecerá a todos los lectores de este material, que quieran hacer comentarios o que detecten algunos errores, favor de hacerlo por escrito dirigido a la Coordinación de la Carrera de Ingeniería Petrolera, División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, UNAM.

CAPITULO II

CONVERSION DE UNIDADES Y ANÁLISIS DIMENSIONAL

En la solución de problemas relacionados con el flujo de fluidos es muy común que sea necesario algún conocimiento de análisis dimensional y conversión de unidades ya que pocos problemas de ingeniería son resueltos sin la aplicación de alguna de estas técnicas matemáticas.

El objetivo de este capítulo es Revisar estas herramientas matemáticas necesarias para analizar trabajos realizados en el área de la ingeniería petrolera, ya que de esta manera se facilitará la solución de algún problema relacionado con ésta.

Aún cuando son utilizados diferentes sistemas de unidades, el sistema absoluto Es el más común.

Es necesario diferenciar entre dimensiones y unidades. Dimensiones son conceptos básicos de medición: longitud, tiempo, masa y temperatura

Las unidades son una forma de expresar las dimensiones: lb o g para masa, pg o m para longitud, hr o seg para tiempo y °C, °K, °F Y °R para temperatura.

En el cálculo de constantes de conversión, para obtener una ecuación dimensionalmente correcta, se ha notado que la constante tiene unidades pero no dimensiones. Además es posible tener un número adimensional que debe tener unidades para obtener una ecuación dimensionalmente correcta.

Una de las más poderosas herramientas del análisis dimensional es la habilidad para obtener grupos adimensionales adecuados que describan un experimento particular o sirvan como funciones de correlación de un conjunto de datos.

Se puede definir una ecuación funcional como una ecuación en la cual las cantidades fundamentales en cada miembro de la ecuación son las mismas, es decir que la ecuación tenga homogeneidad dimensional. Una ecuación funcional es válida en cualquier sistema de unidades, siempre que éstas sean consistentes.

El Teorema π de Buckingham es un método mas generalizado para efectuar el análisis dimensional. Este teorema ha sido usado ampliamente en la solución de problemas de flujo de fluidos y una de sus ventajas principales es que se obtienen grupos adimensionales numérica y dimensionalmente independientes del sistema de unidades empleado.

Este teorema establece que: "si una ecuación es dimensionalmente homogénea, puede reducirse a una relación entre un conjunto de productos adimensionales".

Se considera que un conjunto de productos adimensionales de variables dadas es completo si cada producto es independiente de los otros. En general se establece que si hay "n" variables dimensionales en una ecuación dimensionalmente homogénea, descrita por "m" dimensiones fundamentales, se puede obtener:

$$i=n-r$$

donde:

i = número de productos adimensionales independientes.

n = número de variables dimensionales

r = rango de la matriz dimensional de "m" renglones y "n" columnas (n x m).

El análisis dimensional es un método matemático muy útil en:

- a) Cambio de unidades
- b) Verificación de ecuaciones
- c) Determinación de grupos adimensionales, esto es, determinar un arreglo conveniente de variables tal que sea obtenido un número adimensional.
- d) Planeación de experimentos sistemáticos.

CONVERSIÓN DE UNIDADES Y ANALISIS DIMENSIONAL

PROBLEMAS RESUELTOS

1. La ecuación de estado para gases reales en ingeniería está dada *como*:

$$pV = znRT$$

donde: $R = \text{constante del gas} = 82.06 \frac{(\text{atm})(\text{cm}^3)}{(\text{g-mol})(^\circ\text{K})}$

para: p presión, atm

V volumen, cm^3

n número de g – mol

T temperatura, $^\circ\text{K}$

Z factor e compresibilidad, adimensional.

Se desea convertir a unidades prácticas en la industria petrolera donde:

p - presión, $\text{lb/pg}^2 \text{ abs}$,

V - volumen, pie^3

n - lb-mol

T – temperatura, $^\circ\text{R}$

z - factor de compresibilidad, adimensional

$$R = \text{constante del gas} = X \left[\frac{(\text{lb} / \text{pg}^2 \text{ abs})(\text{pie}^3)}{(\text{lb} - \text{mol})(^\circ\text{R})} \right]$$

Los siguientes factores de conversión son necesarios:

$$1 \text{ pie}^3 = (30.48)^3 \text{ cm}^3$$

$$1 \text{ atm} = 14.7 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs.}$$

$$1 \text{ lb} = 453.6 \text{ g}$$

$$1 \text{ } ^\circ\text{R} = 1.8 \text{ } ^\circ\text{K}$$

Empezar con:

$$82.06 \frac{(atm)(cm^3)}{(g-mol)(^{\circ}K)}$$

y convertir a: $(x) \frac{(lb/pg^2 abs)(pie^3)}{(lb-mol)(^{\circ}R)}$

así:

82.06	atm	14.7 lb/pg ² abs	Cm ³	1 pie ³		453.6 g-mol	1	°K
		1 atm		(30.48) ³ cm ³	g-mol	1 lb-mol	°K	1.8 °R

Resolviendo numéricamente se tiene: $\frac{(82.06)(14.7)(453.6)}{(30.48)^3 (1.8)} = 10.72$

o: $R = 10.72 \frac{(lb/pg^2 abs)(pie^3)}{(lb-mol)(^{\circ}R)}$

De donde la ecuación general de los gases reales queda como:

$$pV = znRT = (10.72) znT$$

Donde:

p _ presión en lb/pg² abs.

V _ volumen en pie³

n - lb-mol

T - temperatura en °R

2. Suponer que se tiene un rectángulo de 7.62 cm. de ancho y 60.96 cm. de largo, (Fig. 2.1)

$$w = 7.62 \text{ cm} = 3 \text{ pg} = 1/4 \text{ pie}$$

$$L = 60.96 \text{ cm} = 2 \text{ pie} = 2/3 \text{ yd}$$

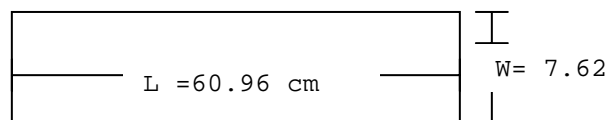


Fig. 2.1

Asignando valores numéricos al rectángulo se puede verificar cualquier conversión que se desee hacer.

Es conocido que la ecuación para el área de un rectángulo es:

$$A = wL \quad (2.2)$$

donde: A área en cm^2
 w ancho en cm
 L longitud en cm

Suponer que se desea resolver directamente para el área en pie^2 y además sustituir L en yardas y w en pg en la Ec. 2.2. Por lo tanto, se debe determinar un factor de conversión C tal que se pueda multiplicar pg por el factor de conversión y obtener el área en pie^2 .

La ecuación dimensionalmente correcta es:

$$A (\text{cm}^2) = w(\text{cm})L(\text{cm}) \quad (2.3)$$

La ecuación que se desea es:

$$A (\text{pie}^2) = Cw(\text{pg})L(\text{yd}) \quad (2.4)$$

Procedimiento a)

1. Iniciar con la ecuación que es dimensionalmente correcta.
2. Convertir cada miembro de la ecuación a las unidades deseadas.
3. Resolver algebraicamente para la conversión de la constante C.
4. Nota: Dejar cualquier constante establecida, tal como $\frac{1}{2}$ en $S = \frac{1}{2}gt^2$ esto es, no cambiar de su posición cuando se resuelva algebraicamente para la constante de conversión.

Solución a)

1) La ecuación dimensionalmente correcta es:

$$A (\text{cm}^2) = w(\text{cm})L(\text{cm})$$

Los siguientes factores de conversión serán necesarios en la solución para C en la Ec. 2.4

$$A(\text{pie}^2) = Cw(\text{pg})L(\text{yd})$$

$$30.48 \text{ cm} = 1 \text{ pie}$$

$$2.54 \text{ cm} = 1 \text{ pg}$$

$$3 \text{ pies} = 1 \text{ yd}$$

2) Convirtiendo cada miembro de la Ec. 2.4 a las unidades deseadas:

$A(\text{cm}^2)$	1 pie^2
	$(30.48 \text{ cm})^2$

$$= C$$

$W(\text{cm})$	1 pg	$L (\text{cm})$	1 pie	1 yd
	2.54		30.48 cm	3 pie

3) Resolviendo algebraicamente para C:

$$\frac{1}{(30.48)^2} = \frac{C}{(2.54)(30.48)(3)}$$

$$C = \frac{(2.54)(30.48)(3)}{(30.48)^2} = \frac{1}{4} = 0.25$$

$$C = 0.25 \left[\frac{\text{cm cm pie}^2}{\text{pg yd cm}^2} \right]$$

$$C = 0.25 \left[\frac{LL L^2}{LL L^2} \right] = 0.25$$

Se puede observar que la constante C tiene las unidades de:

$$\left| \frac{\text{cm cm pie}^2}{\text{pg yd cm}^2} \right|$$

y sin embargo es adimensional.

La ecuación final con unidades es escrita como sigue:

$$A(\text{pie}^2) = \left\{ 0.25 \left| \frac{\text{cm cm pie}^2}{\text{pg yd cm}^2} \right| \right\} \left| W \text{pg} \quad L \text{yd} \right|$$

Nótese que la constante C convierte la Ec.2.5 a las unidades de la Ec.2.3 la cual es dimensionalmente correcta.

Haciendo referencia a la Fig. 2.1, la Ec. 2.5 puede ser fácilmente comprobada:

$$A(\text{pie}^2) = (0.25)w(\text{pg})L(\text{yd})$$

$$A(\text{pie}^2) = (1/4) (3)(2/3) = 1/2 \text{ pie}^2$$

De la Fig. 2.1 se nota que:

$$w = 1/4 \text{ pie y } L = 2 \text{ pie o}$$

$$A(\text{pie}^2) = (1/4 \text{ pie}) (2 \text{ pie}) = 1/2 \text{ pie}^2$$

Procedimiento b):

- 1) Iniciar con la Ec. 2.4 con las unidades deseadas.
- 2) Convertir después a una ecuación que sea dimensionalmente correcta.
- 3) No es necesario resolver algebraicamente para la constante de conversión.
- 4) De nuevo, cualquier constante establecida en la ecuación, tal como 1/2 en $S = 1/2gt^2$ no debe ser cambiada de posición.

Este método ofrece la ventaja de no tener que resolver algebraicamente para C.

Solución b):

$$1) A(\text{pie}^2) = Cw(\text{pg})L(\text{yd})$$

- 2) Convirtiendo a las unidades que son dimensionalmente correctas:

$A(\text{pie}^2)$	$(30.48 \text{ cm})^2$	=	$W (\text{pg})$	$\frac{2.54 \text{ cm}}{1 \text{ Pg}}$	$L(\text{yd})$	$\frac{3 (\text{ft})}{1 \text{ yd}}$	$\frac{30.48}{1 \text{ ft}}$
-------------------	------------------------	---	-----------------	--	----------------	--------------------------------------	------------------------------

- 3) Resolviendo numéricamente:

$$\underline{(30.48)^2} \quad (2.54) (3) (30.48)$$

1

1

Agrupando términos en el segundo miembro:

$$\frac{(2.54)(3)(30.48)}{(30.48)^2} = 0.25$$

Nuevamente la constante de conversión queda:

$$0.25 \left[\frac{cm}{pg} \left| \frac{cm}{yd} \right| \frac{pie^2}{cm^2} \right]$$

Cualquiera de estos dos métodos es satisfactorio y una preferencia por el a) o el b) puede ser seleccionada por el lector.

3. La Ley de Darcy para flujo lineal incompresible está dada como:

$$q = \frac{KA\Delta p}{\mu L} \quad (2.6)$$

donde:

q = gasto , cm^3/seg
 k = permeabilidad , darcy
 A = área , cm^2
 Δp = caída de presión , atm
 μ = viscosidad , cp
 L = longitud , cm

Se desea obtener una constante de conversión en la Ec. 2.6 tal que:

$$q = c \frac{KA\Delta p}{\mu L}$$

donde:

q , bl/día
 k , darcy
 A , pie^2
 Δp , lb/pg²
 μ , c p
 L , pie

Iniciando con las unidades que son dimensionalmente correctas y convirtiendo a las unidades

deseadas se tiene:

$$\frac{q \text{ cm}^3}{\text{seg}} = \frac{0.5434 \text{ bl/ día}}{1 \text{ cm}^3 / \text{seg}}$$

$$=C \left| \frac{\text{K darcy}}{\text{cm}^2} \right| \frac{\text{A cm}^2}{(30.48 \text{ cm})^2} \frac{1 \text{ pie}^2}{\Delta p \text{ atm}} \frac{14.7 \text{ lb/pg}^2}{1 \text{ atm}} \frac{\mu \text{ cp}}{\text{Lcm}} \frac{30.48 \text{ cm}}{1 \text{ pie}}$$

Resolviendo numéricamente para c:

$$\frac{0.5434}{1} = \frac{C(14.7)(30.48)}{(30.48)^2} \quad C = \frac{(0.5434)(30.48)^2}{(14.7)(30.48)} = 1.127$$

Las unidades de C son:

$$C=1.127 \left| \frac{\text{bl/día}}{\text{cm}^3 / \text{seg}} \right| \frac{\text{cm}^2}{\text{pie}^2} \frac{\text{Atm}}{\text{lb/pg}^2} \frac{\text{pie}}{\text{cm}}$$

Sin embargo, C es adimensional:

$$C= \left| \frac{\text{L}^3 \text{T}^{-1}}{\text{L}^3 \text{T}^{-1}} \right| \frac{\text{L}^2}{\text{L}^2} \frac{\text{FL}^{-2}}{\text{FL}^{-2}} \frac{\text{L}}{\text{L}}$$

La Ec. 2.6 con las unidades deseadas es:

$$q(\text{bl} / \text{día}) = \left\{ 1.127 \left| \frac{\text{bl} / \text{día}}{\text{cm}^3 / \text{seg}} \right| \frac{\text{cm}^2}{\text{pie}^2} \frac{\text{atm}}{\text{lb} / \text{pg}^2} \frac{\text{pie}}{\text{cm}} \right\} \frac{K (\text{darcy}) A (\text{pie}^2) \Delta p (\text{lb} / \text{pg}^2)}{\mu (\text{cp}) L (\text{pie})}$$

generalmente escrita como:

$$q = 1.127 \frac{K A \Delta p}{\mu L}$$

4. Una forma del número de Reynolds adimensional para flujo bifásico es:

$$N_{\text{Re}} = \frac{q \ell d}{\mu L} \quad (2.7)$$

donde:

q - gasto , pie³/seg
 ℓ - densidad , lbm/pie³
 μ - viscosidad , lbm/bl
 d - diámetro , pie
 A - Área , pie²

Sin embargo, una forma más útil de este número con respecto al diagrama de Moody para flujo bifásico es:

$$N_{Re} = c \frac{q\ell}{d\mu}$$

donde:

q - gasto , bl/día
 ℓ - densidad , lbm/bl
 d - diámetro , pie
 μ - viscosidad , cp

Determinar la constante C, considerando que $A = \pi d^2/4$

Procedimiento a):

Iniciando con las unidades dimensionalmente correctas y convirtiendo a las unidades deseadas se tiene:

$$N_{Re}=C \left| \begin{array}{c|c|c|c|c|c} q \text{ pie}^3 & 1 \text{ lb} & 86400\text{seg} & \ell \text{ lbm} & 5.61 \text{ pie}^3 & 4 \\ \hline \text{seg} & 5.61 \text{ pie}^3 & \text{día} & \text{pie}^3 & \text{bl} & \pi d \text{ pie} \end{array} \right|$$

$$\left| \begin{array}{c|c} & \text{lbm/pie-seg} \\ \hline \mu \text{ (lbm/pie-seg)} & 1.488 \times 10^3 \text{ cp} \end{array} \right|$$

La constante $4/\pi$ establecida en la ecuación anterior no será incluida en la constante C. Resolviendo para C se tiene:

entonces

Procedimiento b):

De la ecuación de N_{Re} con las unidades dimensionalmente correctas se tiene:

5. Empleando el método de Homogeneidad Dimensional, desarrollar una expresión funcional

para el flujo de un fluido incompresible en una sola fase a través de una tubería horizontal.

1) Variables posibles:

a) Gradiente de presión..

b) Diámetro de la tubería

c) Densidad del fluido.

d) Viscosidad del fluido.

e) Velocidad del fluido.

2) Preparar una tabla de símbolos y dimensiones:

Variable	Símbolo	Dimensiones (MLT)
Gradiente de presión	dp/dL	$ML^{-2}T^{-2}$
Diámetro	d	L
Densidad	ρ	ML^{-3}
Viscosidad	μ	$ML^{-1}T^{-1}$
Velocidad	V	LT^{-1}

3) Escribiendo las ecuaciones para la solución:

$$\frac{dp}{dL} = f(d, \mu, \rho, V)$$

$$\frac{dp}{dL} = C(d)^a (\rho)^b (\mu)^c (V)^d$$

$$ML^{-2}T^{-2} = (L)^a (ML^{-3})^b (ML^{-1}T^{-1})^c (LT^{-1})^d$$

4) Igualando exponentes de dimensiones semejantes:

$$\text{para M: } 1 = b + c$$

$$\text{para L: } -2 = a - 3b - c + d$$

$$\text{para T: } -2 = -c - d$$

Resolviendo para a, b y d en función de c se tiene:

$$a = -c - 1$$

$$b = 1 - c$$

$$d = 2 - c$$

Por lo tanto:

$$\frac{dp}{dL} = Cd^{-c-1} \ell^{1-c} \mu c V 2^{-c}$$

$$\frac{dp}{dL} = C \frac{\ell V^2}{d} \left(\frac{dv \ell}{\mu} \right)^{-c}$$

$$\text{o: } \frac{dp}{dL} \left(\frac{d}{\ell V^2} \right) = C \left(\frac{dv \ell}{\mu} \right)^{-c}$$

$$\text{o: } \frac{dp}{dL} \left(\frac{d}{\ell V^2} \right) = f \left(\frac{dv \ell}{\mu} \right)$$

6. Resolver el problema 5 empleando el Teorema π de Buckingham.

1) Preparar una Tabla de Símbolos y dimensiones:

Variable posible	Símbolo	Dimensiones (MLT)
Diámetro	d	L
Densidad	ℓ	ML^{-3}
Velocidad	V	LT^{-1}
Viscosidad	μ	$ML^{-1}T^{-1}$
Gradiente de presión	dp/dL	$ML^{-2}T^{-2}$

2) Número de variables dimensionales, $n = 5$

3) Número de dimensiones, $m = 3$

4) Formar una matriz dimensional y obtener su rango.

	d	ℓ	v	μ	dp/dL
M	0	1	0	1	1
L	1	-3	1	-1	-2
T	0	0	-1	-1	-2

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & -3 & 1 & -1 & -2 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & -2 \end{vmatrix}$$

Esta matriz contiene al menos un determinante de tercer orden diferente de cero:

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -2 \\ -1 & -1 & -2 \end{vmatrix} = -1 + 0 - 2 - 1 - 1 - 2 = -7 \neq 0 \therefore r = 3$$

5) i $= (n-r) = (5-3) = 2 \therefore$ se requieren 2 grupos adimensionales (π_1 π_2)

6) Seleccionar ℓ, v y μ como variables de repetición, para formar un núcleo de variables, (ℓ, v, μ)

Estas contienen M, L Y T y no pueden formar un grupo adimensional entre ellas.

7) Expresar productos adimensionales de π ; repitiendo las mismas variables del núcleo en cada uno de los grupos y además, incluir alguna de las variables no consideradas en éste.

$$\pi_1 = (\ell)^{a_1} (v)^{b_1} (\mu)^{c_1} (d)$$

$$\pi_2 = (\ell)^{a_2} (v)^{b_2} (\mu)^{c_2} \left(\frac{dp}{dL} \right)$$

8) Escribir las ecuaciones dimensionales para cada término:

$$(M^0 L^0 T^0) = (ML^{-3})^{a_1} (LT^{-1})^{b_1} (ML^{-1}T^{-1})^{c_1} (L)$$

$$(M^0 L^0 T^0) = (ML^{-3})^{a_2} (LT^{-1})^{b_2} (ML^{-1}T^{-1})^{c_2} (ML^{-2}T^{-2})$$

9) Igualando exponentes de dimensiones semejantes:

para π_1 :

para M:

$$\left. \begin{array}{l} a_1 + c_1 = 0 \\ -3a_1 + b_1 - c_1 + 1 = 0 \\ -b_1 - c_1 = 0 \end{array} \right\} \text{Re solviendo } \begin{array}{l} a_1 = 1 \\ b_1 = 1 \\ c_1 = -1 \end{array}$$

para T:

Para π_2

Para M:

$$\left. \begin{array}{l} a_2 + c_2 = 0 \\ -3a_2 + b_2 - c_2 = 0 \\ -b_2 - c_2 = 0 \end{array} \right\} \text{Re solviendo } \begin{array}{l} a_2 = -2 \\ b_2 = -3 \\ c_2 = -1 \end{array}$$

Para T:

10) Sustituir cada uno de los exponentes en los grupos π_1 y π_2 correspondientes:

$$\pi 1 = \ell^{a1} v^{b1} \mu^{c1} d$$

$$\pi 1 = \ell^1 v^1 \mu^{-1} d$$

$$\pi 1 = \frac{dv\ell}{\mu}$$

el cual es el número de Reynolds.

$$\pi 2 = \ell^{a2} v^{b2} \mu^{c2} \frac{dp}{dL}$$

$$\pi 2 = \ell^{-2} v^{-3} \mu^1 \frac{dp}{dL} = \left(\frac{\mu dp / dL}{\ell^2 v^3} \right)$$

Sin embargo, $\pi 1$ y $\pi 2$ no representan todos los grupos adimensionales posibles para el problema de flujo en tubería.

Por el simple recurso de cambiar las variables de repetición se pueden formar más de ocho grupos adimensionales.

Cualquier serie de (n-r) grupos adimensionales (independientes) puede ser convertida a una nueva serie de (n-r) grupos adimensionales independientes por la combinación lineal de la serie original.

7. Resolver las siguientes conversiones deseadas:

a) **82 yardas a cm.**

82 yd	3 pie	30.48 cm	= 7498.08 cm
	1yd	1 pie	

b) **2 millas a pg**

2 millas	1609 m	100 cm	1 pg	= 126 692.91 pg
	1 milla	1 m	2.54 cm	

c) **200 lb/pg² abs. a atmósferas.**

200 lb/pg ² abs	1 atm	= 13.605 atm
	14.7lb/pg ² abs	

d) **800 lb/pg² abs. a pg. de Hg.**

800 lb/pg ² abs.	76 cm Hg	1 pg	= 1 628.37 pg Hg
	14.7 lb/pg ² abs	2.54 cm	

e) 600 lb/pg² abs. a mm. de Hg

600 lb/pg ² abs.	76 cm Hg	10 pg	= 31 020.41mm de Hg
	14.7 lb/pg ² abs	1 cm	

f) 40 gm/lt a lbm/pie³

40 gm	1 lbm	28.317 lt	= 2.49 lbm /pie ³
1 lt	454 gm	1 pie ³	

8. Expresar la siguiente ecuación en las unidades indicadas. Una columna de acero puede ser diseñada con la siguiente ecuación:

$$\frac{F}{A} = C \left(\frac{\pi^2 E}{(L/K)^2} \right)$$

donde:

E- lb/pg²
L- cm
K- cm

F- lbs
A- pg²
C- adim

Determinar el valor de C tal que las siguientes unidades puedan ser usadas:

E- lb/pg²
L- cm
K- cm

F- gm
A- pg²

$$f(lb) = F(gm) \cdot \frac{1lb}{454gm} = 0.002203$$

$$A(pg^2) = A(cm^2) \cdot \frac{1pg^2}{6.4516cm^2} = 0.155A$$

$$\frac{0.002203P}{0.155A} = \frac{\pi^2 E}{(L/K)^2}$$

$$\frac{F}{A} = \frac{(0.155)\pi^2 E}{(0.002203)(L/K)^2}$$

$$\frac{F}{A} = 70.358 \frac{\pi^2 E}{(L/K)^2} \quad \therefore C = 70.358$$

9. Usando el principio de homogeneidad dimensional demostrar que:

$$\Delta p = C \ell g h$$

Usando el sistema FLT:

Variable	Símbolo	Dimensiones (FLT)
Incremento de presión	Δp	FL^{-2}
Densidad	ℓ	$FL^{-4} T^2$
Aceleración de la gravedad	g	LT^{-2}
Altura	h	L

$$\Delta P = C(\ell)^a (g)^b (h)^c$$

$$FL^{-2} = C(FL^{-4}T^2)^a (LT^{-2})^b (L)^c$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Para } F: 1 = a \\ \text{Para } L: -2 = -4a + b + c \\ \text{Para } T: 0 = 2a - 2b \end{array} \right\} \text{Resolviendo} \quad \begin{array}{l} a = 1 \quad c = -2 + 4a - b \\ 2b = 2a \quad c = 1 \\ b = 1 \end{array}$$

Por lo tanto:

$$\Delta p = C \ell^1 g^1 h^1$$

$$\Delta p = C \ell g h$$

10. Con el sistema FLT encontrar la altura con la cual un líquido se eleva en un tubo capilar, emplear el método de Homogeneidad Dimensional, usando las siguientes variables:

Variable	Símbolo	Dimensiones
Altura de la columna de líquido	h	L
Densidad del líquido	ℓ	$FL^{-4}T^2$
Radio del tubo	r	L
Tensión superficial	t	FL^{-1}
Aceleración de la gravedad	g	LT^{-2}

$$\begin{aligned} h &= f(\ell, r, t, g) \\ h &= C(\ell)^a (r)^b (t)^c (g)^d \\ L &= (FL^{-4}T^2)^a (L)^b (FL^{-1})^c (LT^{-2})^d \end{aligned}$$

Para F: $0 = a + c$
 Para L: $1 = -4a + b - c + d$
 Para T: $0 = 2a - 2d$

Entonces: $a = -c$ $c = -a$
 $b = 1 - 2(-a)$
 $b = 1 + 4a + c - d$ $b = 1 + 2a$
 $= 1 - 4c + c - a$
 $= 1 - 3c + c$
 $b = 1 - 2c$

por lo tanto: $h = Cr \ell a r 2^a t - a g a$
 $= Cr(\ell g r^2/t)a$

$$\frac{h}{r} = f\left(\frac{\ell g r^2}{t}\right)$$

PROBLEMAS PROPUESTOS

SERIE 1. III

1.1 El gradiente de presión de un fluido es de 30 g/cm² /pie. Convertir este gradiente a lb/pg² /pie

Solución:

$$G = 0.434 \text{ lb/pg}^2 / \text{pie} \text{ (Gradiente de presión del agua dulce)}$$

1.2 Demostrar que el número de Reynolds es adimensional:

$$N_{Re} = \frac{dv\ell}{\mu}$$

Donde:

d = diámetro, cm o pie

v = velocidad, cm/seg o pie /seg

ℓ = densidad, g/cm³ o lb pie-seg

μ = viscosidad, poise o lbm/pie-seg

1.3 De la ley de Darcy, encontrar las dimensiones de "k":

$$q = \frac{kA\Delta p}{\mu L}$$

q= gasto, cm³/seg

A= área, cm²

Δp = caída de presión, atm

μ = viscosidad, cp

L= longitud, cm

k= permeabilidad, darcy

Solución

$$K=L^2$$

1.4 Resolver el problema resuelto 6, utilizando d, v y ℓ como variable de repetición.

Solucion:

$$\pi_3 = \frac{d(dp/dL)}{v^2 \ell}$$

1.5 Convertir las siguientes cantidades a las unidades deseadas:

- a) $200 \text{ lb}_m/\text{pie}^3 = x \text{ lb}_m/\text{gal}$
- b) $22 \text{ g}_m/\text{lt} = x \text{ lb}_m/\text{pie}^3$
- c) $200 \text{ g}_m/\text{seg}^2 = x \text{ lb}_m/\text{día-año}$
- d) $1 \text{ lb pg}^2 = x \text{ lb}/\text{pie}^2$
- e) $1 \text{ lb pg}^2 = x \text{ g}/\text{cm}^2$

Solución:

- a) $x = 26.74 \text{ lb}_m/\text{gal}$
- b) $x = 1.372 \text{ lb}_m/\text{pie}^3$
- c) $x = 1.2 \times 10^{12} \text{ lb}_m/\text{día-año}$
- d) $x = 144 \text{ lb}/\text{pie}^2$
- e) $x = 70.37 \text{ g}/\text{cm}^2$

SERIE 2. II

2.1 Un Pozo profundo a 10400 pie con una barrea de $12 \frac{1}{4}$ pg, resultando un agujero de aproximadamente el mismo diámetro. El peso del lodo en todo el pozo hasta la superficie es de 81.12 lb/pg^3 (1.3 g/cm^3). ¿Qué presión es ejercida sobre un área de 1 pg^2 , en el fondo del pozo? Expresar la respuesta en lb/pg^2 , g/pg^2 , g/cm^2 y lb pie^2

- a) $Ph = 5867.7 \text{ lb/pg}^2$
- b) $Ph = 2.664 \times 10^6 \text{ g/pg}^2$
- c) $Ph = 412\,911 \text{ g/cm}^2$
- d) $Ph = 844\,949 \text{ lb pie}^2$

2.2 Convertir las siguientes cantidaes a las unidades deseadas:

- a) 5 BTU/ gal a $\text{m-g}_m/\text{pie}^3$
- b) 1.21 (ton) (kg) / (pie) (milla) (seg) a (poise) (HP) / (stoke)

Solución : **a) $4.027 \times 10^6 \text{ m-g}_m/\text{pie}^3$**
 b) $3.24 \times 10^{-5} \text{ poise HP/ stoke}$

2.3 Convertir la siguiente cantidad a las unidades desadas:
 180 (milla) (lb) (HP) / seg a (cm) (g) (BTU) / (año^2)

Solucion: **$1.769 \times 10^{19} \text{ (cm) (g) (BTU) / (año}^2\text{)}$**

2.4 Convertir las siguientes cantidades a un conjunto de unidades MLT, usando libras, pie y minuto:

- a) $34 \text{ (lb/pg}^2\text{) (cp) / (día) (pie) (HP)}$
- b) $0.01 \text{ (watt) (stoke)(hr) / (acre) (pie) (atm)}$

Solución:
a) $4.15 \times 10^{-6} \text{ (lb/pie}^2\text{) (lb/pie-min) / (min) (pie) (lb-pie/min)}$
b) $1.859 \times 10^{-8} \text{ (lb -pie/min) (pie}^2/\text{min) (min)/ (pie}^2\text{) (pie)(lb-pie}^2\text{)}$

2.5 El volumen de un yacimiento está dado generalmente en pie^3 ; empleado la siguiente formula:

donde : $v = 43560 Ah$
 $v = \text{volumen, pie}^3$
 $A = \text{área, acre}$
 $H = \text{espesor, pie}$

Calcular otra constante para sustituir la constante 43560 con las siguientes unidades:

$V = \text{cm}^3$
 $A = \text{pg}^2$
 $h = \text{yd}$

Solucion: **$V = 590 Ah$**

SERIE 3.II

3.1 Aplicando el principio de Homogeneidad Dimensional, demostrar que:

a) $M = C \ell v A$ (usando el sistema MLT)

donde: M = gasto másico (masa por unidad de tiempo)
 ℓ = densidad de la masa
 v = velocidad lineal
 A = área de la sección transversal

b) $q = C(r^4 / \mu) (dp/dx)$ (usando el sistema FLT)

donde: q = gasto (volumen por unidad de tiempo)
 r = radio
 μ = viscosidad dinámica
 dp/dx = gradiente de presión

3.2 Determinar una ecuación funcional por medio del Método de Homogeneidad Dimensional:

a) ℓ = densidad del fluido, fluyendo alrededor de un misil balístico
 v = velocidad del misil balístico
 E = módulo de elasticidad del fluido.

Emplear el sistema FLT

d = diámetro de tubería
 v = velocidad del fluido en la tubería
 ℓ = densidad del fluido en la tubería
 μ = viscosidad dinámica del fluido en la tubería.

Emplear el sistema MLT.

Solución:

a) $v = C(E/\ell)^{1/2}$

b) $v = C(\mu/d\ell)$

3.3 Convertir las siguientes cantidades del sistema FTL al sistema MLT o viceversa. Demostrar todos los cálculos.

- a) Trabajo (FI), al sistema MLT.
- b) Potencia (ML^2T^{-2}) al sistema FLT
- c) Módulo de elasticidad (FL^{-2}) al sistema MLT
- d) Densidad de la masa (ML^{-3}) al sistema FTL

Solución:

- a) $W (M^1 L^2 T^{-2})$
- b) $P(FLT^{-1})$
- c) $E (ML^{-1}T^{-2})$
- d) $\ell (FL^{-4}T^2)$

3.4 Encontrar la tensión en un cable con sección transversal circular uniforme, girando en su propio eje perpendicular al plano, empleando el método de Homogeneidad Dimensional. Suponer que las variables siguientes son necesarias; utilizar el sistema FLT:

Variable	Símbolo
Tensión	T
Densidad lineal del cable	ℓ
Radio del cable	r
Velocidad angular	w

Solucion:

$$T = c \ell r^2 w^2$$

3.5 Determinar el volumen de un líquido viscoso fluyendo cada segundo a través de un tubo de sección transversal circular, empleando el método de Homogeneidad Dimensional, y con el sistema MLT. Se tienen las siguientes variables físicas:

Variable	Símbolo
Volumen por segundo	q
Gradiente de presión	dp/dl
Radio del tubo	r
Viscosidad Dinamica	μ

Solución:

$$q = C (r^4 / \mu) (dp/dl)$$

4.1 Usando el Teorema π de Buckingham, encontrar tres grupos adimensionales para las variables involucradas en el flujo de un fluido a través de una presa. Se tiene las siguientes variables:

q = gasto de descarga de fluido
 H = altura del fluido
 g = aceleración gravitacional
 ℓ = densidad del fluido
 μ = viscosidad dinámica del fluido
 σ = tensión interfacial, en la interface aire – fluido

Usar H , q y μ como las tres variables usadas en los cálculos de cada término π i. Emplear el sistema MLT.

Solución:

$$\pi_1 = H \sqrt{\frac{g \ell}{\mu}}$$

$$\pi_2 = q^4 \sqrt{\frac{g^3 \ell^5}{\sigma^5}}$$

$$\pi_3 = \mu^4 \sqrt{\frac{g}{\ell \sigma^3}}$$

4.2 La solución de la ecuación de la constante

$$R = \frac{PV}{ZnT} = 10.73 \frac{(lb/pg^2 abs)(pie^3)}{(lb-mol)(^{\circ}R)}$$

Donde: P - presión, $lb/pg^2 abs$
 V = volumen, pie^3
 n = $lb.mol$
 T = temperatura, $^{\circ}R$
 z = Factor de compresibilidad, adim.

Calcular el valor de R donde:

P = $lb / pie^2 abs$
 V = cm^3
 n = $g-mol$
 T = $^{\circ}K$

Solución:

$$R = 173470.7 \frac{(lb / pie^2 abs)(cm^3)}{(g - mol)(^{\circ} K)}$$

4.3 Usando el Método de Homogeneidad Dimensional, derivar una ecuación para el período de un péndulo simple. Suponer que las siguientes variables son involucradas:

Variable	Símbolo
Periodo	t
Masa	m
Peso	w
Longitud del brazo	L

- a) Sistema MLT
- b) Sistema FLT

Solución:

$$a) t = c \sqrt{\frac{mL}{W}}$$

$$b) t = c \sqrt{\frac{ml}{w}}$$

4.4 Dada la siguiente ecuación:

$$P_c = \frac{2\sigma \cos \theta}{r}$$

donde: P_c = presión capilar, DINA /cm²
 σ = tensión interfacial, dinas/cm
 r = radio del tubo capilar, cm

encontrar una constante "C" para las siguientes unidades:

P_c = lb/pg² man.
 σ = dinas/pie
 r = pg

Solución: **C = 3.746x 10⁻⁷**

4.5 Encontrar una expresión para la fuerza con la cual el aire se oportuna a que una gota de lluvia se precipite. Empleando el Método de Homogeneidad Dimensional. Suponer las siguientes variables y usar el sistema FTL:

Variable	Símbolo
Fuerza de resistencia	R
Viscosidad dinamica dl aire	μ
Velocidad de la gota de lluvia	V
Radio de la gota de lluvia	r

Solución:

$$R = C \mu v r$$

TABLA II.1 FACTORES DE CONVERSION

Para convertir:

DE	A	MULTIPLICAR		INVERSO	
AREA					
Acre	m ²	4.046856	E 3	2.471054	E-4
	pie ²	4.3560	E 4	2.295684	E-5
darcy	cm ²	9.869230	E-9	1.013250	E 8
	cm ² cp seg ⁻¹ atm ⁻¹	1.00	E 0	1.00	E 0
	m ²	9.869230	E-13	1.0132503	E 12
	md (milidarcy)	1.00	E 3	1.00	E-3
hectárea	acre	2.471054	E 0	4.046856	E-1
	m ²	1.00	E 4	1.00	E-4
milla ²	acre	6.40	E 2	1.5625	E-3
	m ²	2.589988	E 6	3.861022	E-7
pie ²	cm ²	9.290304	E 2	1.076391	E-3
	m ²	9.290304	E-2	1.076391	E 1
	pg ²	1.44	E 2	6.944444	E-3
DENSIDAD					
g _m cm ⁻³	Kg-m ⁻³	1.00	E 3	1.00	E-3
	lbm gal ⁻¹	8.345402	E 0	1.198264	E-1
	lbm pie ⁻³	6.242797	E 1	1.601846	E-2
lbm pie ⁻³	Kg m ⁻³	1.601846	E 1	6.242797	E-2
	lbm bl ⁻¹	5.614583	E 0	1.781076	E-1
	lbm gal ⁻¹	0.1337	E 0	7.479	E 0
FUERZA					
dina	lb _f	2.248089	E-6	4.448222	E 5
	N (Newton)	1.00	E-5	1.00	E 5
Kg _f	lb _f	2.204622	E 0	4.535924	E-1
	N	9.806650	E 0	1.019716	E-1
lb _f	g _f	4.535924	E 2	2.204622	E-3
	N	4.448222	E 0	2.248089	E-1

DE	A	MULTIPLICAR		INVERSO	
GASTO					
bl.día ⁻¹	cm ³ .seg ⁻¹	1.840131	E 0	5.434396	E-1
	cm ³ .min ⁻¹	1.104078	E 2	9.057326	E-3
	gal.min ⁻¹	2.916667	E-2	3.428571	E 1
	gal.día ⁻¹	4.200	E 1	2.380952	E-2
	m ³ .seg ⁻¹	1.840131	E-6	5.434396	E 5
	m ³ .hr ⁻¹	6.624472	E-3	1.509554	E 2
	m ³ .día ⁻¹	1.589873	E-1	6.289810	E 0
	pie ³ .min ⁻¹	3.899016	E-3	2.564750	E 2
	pie ³ .hr ⁻¹	2.33941	E-1	4.274582	E 0
	pie ³ .día ⁻¹	5.614583	E 0	1.781076	E-1
gal.min ⁻¹	m ³ .seg ⁻¹	2.309020	E-5	1.585032	E 4
pie ³ seg ⁻¹	m ³ .seg ⁻¹	6.831685	E-2	3.531466	E 1
pie ³ min ⁻¹	m ³ .seg ⁻¹	4.719474	E-4	2.118880	E 3
LONGITUD					
angstrom	m	1.00	E-10	1.00	E 10
micrón	m	1.00	E-6	1.00	E 6
milla (E.U.)	m	1.609344	E 3	6.213712	E-2
	pie	5.280	E 3	1.893939	E-2
pg	cm	2.540	E 0	3.937008	E 1
	m	2.540	E-2	3.937008	E-1
pie	cm	3.048	E 1	3.28084	E-2
	m	3.048	E-1	3.28084	E 0
yarda	pg.	3.60	E 1	2.777778	E-2
	pie	3.00	E 0	3.3333	E-1
MASA					
lbm	Kg.	4.535923	E-1	2.204623	E 0
oz _m	g.	2.834952	E-2	3.527845	E 1
slug	Kg	1.459390	E 1	6.852178	E-2
	lbm	3.217405	E 1	3.108095	E-2
ton(corta, E.U.)	Kg.	9.071847	E 2	1.102311	E-3
	lbm	2.00	E 3	5.00	E-4
ton(larga, E.U.)	Kg.	1.016047	E 3	9.842064	E-4
	lbm	2.240	E 3	4.464286	E-4

DE	A	MULTIPLICAR		INVERSO	
ton (métrica)	Kg.	1.00	E 3	1.00	E-3
PRESION					
atm (normal;	bar	1.01325	E 0	9.86923	E-1
760 mm de Hg)	lb _{pg} ⁻²	1.46960	E 1	6.80460	E-2
	mm de Hg(0°C)	7.600	E 2	1.315789	E-3
	Pa	1.01325	E 5	9.86923	E-6
	pie de agua (4°C)	3.38995	E 1	2.94990	E-2
bar	lb _{pg} ⁻²	1.450377	E 1	6.894757	E-2
	Pa	1.00	E 5	1.00	E-5
cm de Hg(0°C)	lb _{pg} ⁻²	1.93367	E-1	5.17151	E 0
	Pa	1.33322	E 3	7.50064	E-4
dina.cm ⁻²	lb _{pg} ⁻²	1.450377	E-5	6.894757	E 4
	Pa	1.00	E-1	1.00	E 1
Kg _f .cm ⁻²	bar	9.80665	E-1	1.019716	E 0
	lb _{pg} ⁻²	1.422334	E 1	7.030695	E-2
	Pa	9.80665	E 4	1.019716	E-5
pie de agua(4°C)	lb _{pg} ⁻²	4.33515	E-1	2.30673	E 0
	Pa	2.98898	E 3	3.34562	E-4
TIEMPO					
día	seg	8.64	E 4	1.157407	E-5
	min	1.44	E 3	6.944444	E-4
	hr	2.40	E 1	4.166667	E-2
hr	seg	3.60	E 3	2.777778	E-4
	min	6.00	E 1	1.666667	E-2
min	seg	6.00	E 1	1.666667	E-2
VISCOSIDAD					
c p (centipoise)	dina seg cm ⁻²	1.00	E-2	1.00	E 2
	lb _f seg pie ⁻²	2.088543	E-5	4.788026	E 4
	lbm pie ⁻¹ seg ⁻¹	6.719689	E-4	1.488164	E 3
c st (centistoke)	c p (gm.cm ⁻³) ⁻¹	1.00	E 0	1.00	E 0
	m ² seg ⁻¹	1.00	E-6	1.00	E 6
VOLUMEN					
acre pie	bl	7.758368	E 3	1.288931	E-4

DE	A	MULTIPLICAR		INVERSO	
bl	m ³	1.233482	E 3	8.107131	E-4
	pie ³	4.3560	E 4	2.295684	E-5
	gal	4.20	E 1	2.380952	E-2
	lt	1.589873	E 2	6.289811	E-3
pie ³	m ³	1.589873	E-1	6.289811	E 0
	pie ³	5.614583	E 0	1.781076	E-1
	gal	7.480520	E 0	1.336805	E-1
	lt	2.831685	E 1	3.531466	E-2
gal	m ³	2.831685	E-2	3.531466	E 1
	pg ³	1.728	E 3	5.787037	E-4
	lt	3.785412	E 0	2.64172	E-1
	m ³	3.785412	E-3	2.64172	E 2
lt	pg ³	2.310001	E 2	4.329003	E-3
	m ³	1.00	E-3	1.00	E 3

TABLA II.2 CONVERSION DE ESCALAS DE TEMPERATURA

Para convertir:

DE	A	RESOLVER
°Celsius	°Kelvin	$T_K = T_c + 273.15$
°Fahrenheit	°Celsius	$T_c = (T_F - 32)/1.8$
°Fahrenheit	°Kelvin	$T_K = (T_F + 459.67)/1.8$
°Fahrenheit	°Rankine	$T_R = T_F + 459.67$
°Rankine	°Kelvin	$T_K = T_R / 1.8$

TABLA II.3 CANTIDADES FISICAS UTILIZADAS EN EL ANALISIS DIMENSIONAL *

		DIMENSIONES					
		M	L	T	F	L	T
A	área		L^2			L^2	
c	compresibilidad	M^{-1}	L	T^2	F^{-1}	L^2	
d	diámetro		L			L	
E	módulo de elasticidad	M	L^{-1}	T^{-2}	F	L^{-2}	
F	fuerza	M	L	T^{-2}	F		
g	aceleración de la gravedad		L	T^{-2}		L	T^{-2}
h	altura, profundidad y carga		L			L	
l	longitud		L			L	
m	masa	M			F	L^{-1}	T^2
P	potencia	M	L^2	T^{-3}	F	L	T^{-1}
p	presión	M	L^{-1}	T^{-2}	F	L^{-2}	
q	gasto	L^3	T^{-1}		L^3	T^{-1}	
r	radio		L			L	
t	tiempo		T			T	
v	velocidad		L	T^{-1}		L	T^{-1}
V	volumen		L^3			L^3	
W	peso	M	L	T^{-2}	F		
w	peso específico	M	L^{-2}	T^{-2}	F	L^{-3}	
μ	viscosidad dinámica o absoluta	M	L^{-1}	T^{-1}	F	L^{-2}	T
ν	viscosidad cinemática		L^2	T^{-1}		L^2	T^{-1}
ρ	densidad	M	L^{-3}		F	L^{-4}	T^2
σ	tensión superficial	M	T^{-2}		F	L^{-1}	

* Para las dimensiones de otras cantidades ver referencias (2), (3) y (4) Capítulo II.

REFERENCIAS

- 1) Rodríguez Nieto Rafael; "Apuntes de Principios de Mecánica de Yacimientos"; Facultad de Ingeniería, UNAM.; México, DF.
- 2) León Ventura Raúl; "Apuntes de Mecánica de Fluidos"; Facultad de Ingeniería, UNAM.: México, DF.
- 3) Giles Ronald V.; "Mecánica de Fluidos e Hidráulica"; Serie Shaum, Mc. Graw Hill.
- 4) Brown Kermit E. "Gas Lift Theory and Practice", The Petroleum Publishing Co., Tulsa Oklahoma, 1973.