



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

HISTORIA DE FLUJO DE FLUIDOS Y DE LOS CIENTIFICOS
QUE CONTRIBUYERON A SU DESARROLLO

**TRABAJO MONOGRAFICO DE
ACTUALIZACION**
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A :
ISAIAS ALVAREZ HERNANDEZ



MEXICO, D.F.



EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUIMICA

2004



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

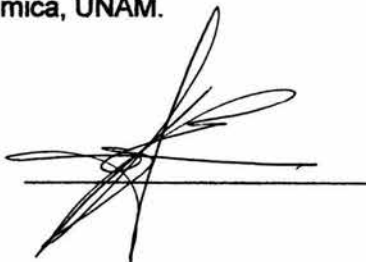
Jurado asignado:

Presidente	Antonio Valiente Barderas
Vocal	Lucila Cecilia Méndez Chávez
Secretario	María Rafaela Gutiérrez Lara
1er. suplente	María de los Ángeles Vargas Hernández
2do. suplente	Martín Rivera Toledo

Sitio donde se desarrolló el tema:

Facultad de Química, Laboratorio de Ingeniería Química
Departamento de Ingeniería Química, UNAM.

Asesor: Dr. Antonio Valiente Barderas



Sustentante: Isaías Álvarez Hernández



Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Álvarez Hernández,
Isaías

FECHA: 06 / sep / 2004

FIRMA: 

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Por haberme permitido terminar mi carrera, y por haberme dado el don de la vida, y por todo lo que me has dado. Gracias señor por todos los beneficios que he obtenido a lo largo de mi vida; una familia como la que tengo, así como amor y salud.

A la Facultad de Química de la UNAM

Por ser la mejor escuela de Química en México, y por ser mi segundo hogar. Al haberme formado como un verdadero profesional, y por haberme enseñado en sus aulas y sus laboratorios, lo difícil pero hermoso de la carrera de Ingeniería Química.

Al Dr. Antonio Valiente Barderas

Por todos sus consejos, enseñanzas, y por toda su paciencia para la realización de este trabajo, y por ser un excelente profesor.

Al respetable Jurado

Dr. Antonio Valiente Barderas, I Q. Lucila Cecilia Méndez Chávez, I Q. María Rafaela Gutiérrez Lara, I Q. María de los Ángeles Vargas Hernández, M en C. Martín Rivera Toledo. Por todas sus comentarios y recomendaciones para mejorar este trabajo.

A mis profesores

Gracias a todos aquellos profesores involucrados en mi formación profesional, en especial a: Antonio Valiente Barderas, José Antonio Ortiz Ramírez, Alejandro Iñiguez Hernández, Ramón Domínguez Betancourt, Marcelino Gómez Velasco, Caritino Moreno Padilla, Martín Rivera Toledo, Javier Audry Sánchez, Carlos Escobar Toledo, Tatiana Klimova Berestneva, Rodolfo Torres Barrera, Joaquín Palacios Alquisira, Ernesto Zeller Epsen, José María García Saíz, Carlos Dormann Montero, Roberto Enríquez Mendoza, Luis Ángel López Latorre, Lucila Cecilia Méndez Chávez, Yolanda Lozada Gómez, Mayo Martínez Khan, Eugenio León Fautch Tapia, Juan Luis Martínez Ledesma, Carlos López Sánchez.

Gracias.

DEDICATORIAS

A mis Padres

I. Q. y Maestro en Educación; Francisco Álvarez Herrera, y Sra. María Emma Hernández de Álvarez, por todo su apoyo incondicional a lo largo de todos mis estudios, y por haber confiando siempre en mi; pues éste trabajo es para ustedes y por ustedes.

A mis dos hermanas, licenciadas en contaduría

Leticia y Susana, por haberme apoyado siempre en cualquier momento, y por todos los momentos más felices que vivimos juntos durante la infancia.

A mis abuelos

Sr. Francisco Álvarez Quintanilla (q.e.p.d), Sr. Manuel Hernández Núñez (q.e.p.d), y Sra. Gregoria Sánchez Bustamante (q.e.p.d), por haberme demostrado su amistad y su cariño, y por todos sus buenos consejos; en especial a ti abuelita Goyita, pues siempre me demostraste todo tu amor y toda tu confianza en cualquier momento, y espero que desde el cielo reces por nosotros, como siempre lo hacías en vida aquí en la tierra. ¡Te quiero mucho!.

A todos mis tíos de la familia Hernández Sánchez

Anastasio, Jorge, Filemón, Bonifacio y Soledad, y a mi prima hermana Beatriz Mendoza Hernández. ¡Arriba San Martín de las Pirámides!. De igual forma, dedico este trabajo a todos los demás familiares más allegados a mí.

A todos mis amigos y compañeros de la generación 1996 – 2000, de la Facultad de Química de la UNAM.

Pero en especial a mi amiga y compañera de toda la vida; I. Q. Citlalli D. Pérez Zárate, por todos sus buenos consejos y por toda su amistad que ha perdurado entre nosotros dos, durante casi 9 años. De igual forma, dedicó este trabajo a mi amigo; I.Q. Héctor Jesús Blancas Cedeño.

Como olvidar a mí mejor amigo de la Facultad de Química; I. Q. Mario Ricardo Bobadilla Dávila, mejor conocido como “El papas”, pues siempre me demostró toda su amistad en cualquier momento.

Gracias.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
---------------------	----------

CAPITULO 1

DE LA PREHISTORIA A LA EDAD MEDIA

1.1	La génesis de los primeros fluidos que se generaron en nuestro planeta	3
1.2	Las primeras civilizaciones y la evolución de la mecánica de los fluidos	5
1.3	El principio de Arquímedes	11
1.4	La contribución histórica de los ingenieros romanos en el desarrollo de la mecánica de los fluidos	21
1.5	Herón de Alejandría y sus aportaciones a la mecánica de los fluidos	27
1.6	Las culturas prehispánicas en América como contribución histórica del desarrollo de la mecánica de los fluidos	30
1.6.1	La cultura azteca	30
1.6.2	La cultura maya	35
1.6.3	La cultura inca	40
1.7	La edad media y las aportaciones de los árabes en el desarrollo de la mecánica de los fluidos	46

CAPITULO 2

DEL SIGLO XIV AL SIGLO XVIII

2.1	Leonardo da Vinci y el principio de la continuidad	53
2.1.1	La hidráulica y las creaciones de Leonardo da Vinci	58
2.2	El principio fundamental de la hidrostática	60
2.3	La máquina hidráulica que desarrolló Galileo Galilei como aportación a la mecánica de los fluidos	62

2.4	El barómetro de Torricelli	67
2.5	La ley de Boyle – Mariotte	72
2.5.1	El experimento de Boyle y el ensayo sobre el aire, publicado por Edme Mariotte en 1676	76
2.6	El principio de Pascal	80
2.7	La ley de Newton de la viscosidad	87
2.8	El tubo de Pitot	93
2.9	El teorema de Bernoulli	97
2.10	Leonhard Euler y las ecuaciones de movimiento	103
2.11	La paradoja de D' Alembert	109
2.12	La ecuación de Chézy	113
2.13	Jean Charles de Borda y sus aportaciones a la mecánica de los fluidos	115
2.14	El tubo de Venturi	119

CAPITULO 3

DEL SIGLO XIX

3.1	Las ecuaciones de Navier – Stokes	122
3.2	La ley de Hagen – Poiseuille	130
3.3	La ecuación de Darcy – Weisbach	136
3.4	El número de Froude	148
3.5	La ecuación de Manning para flujo de fluidos en canales abiertos	153
3.6	El número de Mach	156
3.7	El número de Reynolds	160
3.8	John Rayleigh y sus aportaciones en el campo de la hidrodinámica	165
3.9	El número de Weber	169

CAPITULO 4

DEL SIGLO XX

4.1	Ludwig Prandtl y la teoría de la capa límite	171
4.2	El diagrama de Moody	177
4.3	Theodore von Kármán y las ecuaciones de turbulencia	180
4.4	Paul Richard Heinrich Blasius y sus aportaciones a la mecánica de los fluidos	188
4.5	La ley de Kolmogorov	190
4.6	Hunter Rouse y sus aportaciones al desarrollo histórico de la hidráulica	196
4.7	Robert Byron Bird y sus aportaciones a la dinámica de los fluidos	199
4.8	Fluidos no newtonianos y fluidos que presentan dos fases	201

CONCLUSIONES	217
---------------------	-----

BIBLIOGRAFÍA	218
---------------------	-----

INTRODUCCIÓN

En la mayoría de los currículum o programas de estudio de las carreras de ingeniería química se manejan conocimientos de química, fisicoquímica, física, matemáticas, ingeniería económica y por su puesto de ingeniería química que se abordan en materias llamadas: Balances de materia y energía, Fenómenos de transporte, flujo de fluidos, Transferencia de Calor, Reactores, Simulación, Control, etc. A través del estudio de las diversas materias de la carrera los alumnos van descubriendo los nombres de lo que yo llamaría “próceres”, de nuestra carrera o dicho de otra forma los científicos, ingenieros o pensadores que de una manera u otra contribuyeron a formar el cúmulo de conocimientos que forman la curricula de la ingeniería química. Es común que los estudiantes sepan quienes fueron Newton, Pascal, Bernoulli, Arquímedes, Reynolds o tal vez Boyle, pero creo que pocos saben quienes fueron Prandtl, Poiseuille, Navier, Stokes, Hagen o Weisbach, aunque la mayoría tiene familiaridad con sus nombres con relación a ciertos números adimensionales o a los cálculos y técnicas relacionadas con sus nombres.

Son pocas las universidades y facultades, en donde se enseña la carrera de ingeniería química, que imparten cursos sobre la historia de la ingeniería química, así como los momentos más importantes del desarrollo del conocimiento. Por ello los estudiantes en general desconocen los científicos e ingenieros que contribuyeron al desarrollo de las distintas materias, sus biografías y por su puesto las fotografías o grabados con las efigies de los hombres que contribuyeron a la creación del basto cuerpo de conocimientos que hoy en día forman a la ingeniería química. Por tal razón en el desarrollo de este proyecto de tesis sería deseable que para la formación integral de nuestros estudiantes en la Facultad de Química, existiera este tipo de material (grabados, fotografías, biografías y anécdotas), y que fueran del conocimiento tanto de estudiantes como de profesores de la carrera de ingeniería química, ya que esto nos proporcionaría un sentido de permanencia y orgullo; además, de que serviría de ejemplo para los futuros profesionistas e investigadores.

El número de personajes que de alguna manera han contribuido al desarrollo de las distintas materias que hoy en día se enseñan en las carreras de ingeniería química es desde luego muy grande, por lo que en esta tesis me enfocaré al estudio de aquellos científicos que contribuyeron al desarrollo y conocimiento de la materia: *flujo de fluidos*. Los conocimientos que la integran se han logrado a través del paso del tiempo, así como de los estudios y aplicaciones experimentales en las que contribuyeron un gran número de

científicos de todas las épocas. Sin lugar a dudas esto fomentara el interés de los alumnos por la materia en cuestión, al darse cuenta de que los conocimientos que están recibiendo fueron hechos por personas de carne y hueso como ellos, con cualidades y defectos, pero todos ellos con un inmenso cariño por la investigación, la verdad, el conocimiento y el mejoramiento de la humanidad. Además, se darán cuenta de que en muchos casos fueron personas con intereses en numerosas áreas del conocimiento, y que fueron en algunos otros casos excelentes profesores y formadores de recursos humanos y brillantes investigadores, algunos otros fueron hombres exitosos de empresa, así como filósofos, luchadores y aún teólogos. Las biografías de muchos de los próceres se encuentran en diccionarios, enciclopedias, libros o forman parte de los archivos que hoy en día conservan las universidades, y asociaciones profesionales, y a las que hoy en día se puede acceder por internet. En conclusión en base a lo dicho anteriormente, el objetivo y la finalidad de este proyecto de tesis, sería el de obtener los datos de la mayoría de los personajes célebres y conjuntarlos en este libro, así como publicarlo para que tanto estudiantes como profesores tuvieran acceso inmediato a esa información.

CAPÍTULO 1

DE LA PREHISTORIA A LA EDAD MEDIA

CAPITULO 1. DE LA PREHISTORIA A LA EDAD MEDIA

1.1 LA GÉNESIS DE LOS PRIMEROS FLUIDOS QUE SE GENERARON EN NUESTRO PLANETA

Para empezar y entender mejor el desarrollo de la génesis de los primeros fluidos en nuestro planeta y en el universo, comenzaremos nuestra descripción a partir de la historia de; nuestro planeta, la de la vida y la de la humanidad. Estos han sido modelados por el agua, prodigiosa molécula, que es la sustancia básica en la composición de nuestro organismo y de todas las formas de vida, y que ha sido un factor clave en el desarrollo de las distintas culturas. Bien se puede decir que este maravilloso fluido es un elemento determinante para las distintas formas de vida en nuestro universo. Los fluidos, como genéricamente llamamos a los líquidos y a los gases, nos envuelven formando parte esencial de nuestro medio ambiente. El agua y el aire son los más comunes, y como punto de referencia, se consideran como prototipos de un fluido. Así la experiencia humana con los fluidos se remonta más allá de los tiempos históricos. El manejo de los fluidos en sus distintas formas, ha estado íntimamente ligado al desarrollo de la sociedad. No es de sorprender entonces que desde los inicios de la civilización, la imagen del Universo incluyera a los fluidos como elementos primarios de su constitución; **aire, agua, fuego y tierra**, que son la versión clásica y medieval de gas, líquido, plasma y sólido o dicho de otra forma fluidos y sólidos. Por los tanto, el aire y el agua son parte esencial para la vida en la forma que la conocemos.

Una de las teorías acerca del origen de la vida, y haciendo referencia a la génesis de los primeros fluidos en nuestro planeta y en el universo, era que la vida tuvo que originarse en un ambiente reductor. En realidad, dicho ambiente reductor se encuentra en las atmósferas primitivas ó originales que se cree tuvieron los planetas interiores (Mercurio, Venus, Tierra y Marte), y que todavía poseen los planetas exteriores (Júpiter, Saturno, Urano y Neptupno). Estas atmósferas estaban compuestas por CH_4 , NH_3 , y CO_2 en forma de gases y vapores. Como la evolución de la vida y la atmósfera van íntimamente ligados en el concepto de la génesis de los primeros fluidos generados en nuestro planeta y en el universo, y puesto que el tipo de vida que se conoce actualmente se basa en el carbono, se supone que la vida en el pasado tuvo que originarse de un ambiente rico en carbono. Tan pronto como se estableció la vida en la tierra, fue inevitable que las condiciones químicas de su corteza terrestre, hidrosfera y atmósfera cambiaran de un ambiente reductor a uno oxidante.

Tomando como referencia un registro geológico de estas ideas, y partiendo de que la atmósfera actual es secundaria, y que se ha acumulado después de que una atmósfera primaria se desprendió durante un periodo de calentamiento. Es posible suponer que esta atmósfera secundaria cambio de reductora o (estrictamente no oxidante), a oxidante, durante la historia de la tierra, entonces ¿Cómo y cuándo se dio esta composición?. El registro geológico nos da algunos indicios sobre cómo ha cambiado esta atmósfera secundaria con el tiempo. Probablemente esta atmósfera se acumuló de una mezcla de gases que se desprendieron durante la actividad volcánica, y que posiblemente incluían; H_2O , CO_2 , N_2 , HCL , H_2 y S . De los gases volcánicos desprendidos, solamente el H_2 tiene una velocidad molecular lo suficiente elevada como para escaparse de la gravedad de la tierra. Lo anterior conlleva a decir que solamente quedarían algunos gases; H_2O , CO , CO_2 , N_2 , HCL y S . El H_2O se condensaría para formar los océanos en los cuales se disolvería el HCL , el cual a su vez disolvería ciertas rocas de la corteza para formar cloruros solubles. De igual forma, el CO_2 , también se disolvería en agua, y el ácido carbónico resultante atacaría las rocas de la corteza terrestre. En conclusión a todo esto, se puede decir que esta sería una teoría, sobre la génesis de los primeros fluidos generados en nuestro planeta y en el universo.

En la siguiente tabla se da la composición de las atmósferas planetarias. Las composiciones actuales de dichas atmósferas dependen tanto de la historia evolutiva como de la composición del material original que se acumuló para formar los planetas. Científicamente se cree que dicho material, debió tener una composición semejante a la del sol.

Tabla No 1

PLANETA	COMPOSICIÓN
Mercurio	-----
Venus	$CO_2(H_2O)$
Tierra	$N_2, O_2(CO_2, H_2O, He, NH_3, CH_4)$
Marte	$CO_2(H_2O)$
Júpiter	H_2O, CH_4, NH_3
Saturno	H_2O, CH_4, NH_3
Urano	H_2O, CH_4, NH_3
Neptuno	H_2O, CH_4, NH_3
Plutón	-----

1.2 LAS PRIMERAS CIVILIZACIONES Y LA EVOLUCIÓN DE LA MECÁNICA DE LOS FLUIDOS.

El hombre al hacerse sedentario y convertirse en agricultor debió enfrentarse al manejo del agua, primer fluido que le interesó. Existen todavía trazas de los canales de irrigación que desde tiempos prehistóricos existían en Egipto y Mesopotamia. Se sabe que se hicieron embalses sobre el río Nilo a la altura del Memfis desde hace ya más de seis mil años, para proveer el agua necesaria para las cosechas, y que el río Tigris fue desviado con el mismo propósito por la misma época. En tierra santa se han encontrado acueductos subterráneos, así como pozos antiguos de gran profundidad. Cuenta la leyenda que el rey Senaquerib (705 – 680 a. C), rey de Asiría, mandó a construir un acueducto que abasteciera de agua a su capital, Ninive (691 a. C). Para esto, levantó una presa sobre el río Khosr y encauzó el agua a lo largo de 55 kilómetros de longitud hasta los jardines del palacio, que estaban situados al norte de su capital. Por esa misma época, Exequias rey de Judá entre 715 y 686 a. C., edificó a su vez un acueducto que transportaba el agua hacia Jerusalén. En lo que es ahora Pakistán, en las ruinas de Mojenjo – Daro se ha descubierto que las casas tenían tuberías de cerámica para el agua y para el drenaje.

Se tiene noticia de que en la antigua China existía una vasta red de riegos a partir de los ríos Azul y Amarillo, con los que se podía distribuir el agua a través de las llanuras de ese país. Como se ve, el estudio de la mecánica de los fluidos, tuvo su origen antes de cristo, y algunos de los factores que estimularon el desarrollo de esta ciencia fueron las necesidades ya mencionadas de la distribución del agua para la irrigación, y el consumo humano, así como el desalojo de las aguas negras y los diseños de los barcos comerciales o de guerra. Sin embargo, aunque los diseños eran empíricos y no utilizaban conceptos de mecánica o de matemáticas, sirvieron para el desenvolvimiento de muchas civilizaciones. Desde los tiempos más remotos se conocen obras de ingeniería hidráulica en las que se comenzaron a aplicar los conceptos de las técnicas que hoy llamamos: flujo de fluidos. Como ya se dijo, las primeras obras tienen que ver con los canales de riego construidos en Egipto y Mesopotamia en la planicie situada entre los ríos Tigris y Eufates. También en China y la India se construyeron importantes obras de riego, con grandes ríos que atraviesan esos países. Hace aproximadamente unos 10, 000 años el hombre desarrolló la agricultura, y probablemente aprendió a manejar a los fluidos en forma circunstancial durante este proceso. Por lo que se puede intuir que la humanidad ha siempre vivido con fluidos.

Durante este periodo de tiempo, mejor conocido de la supervivencia, el hombre aprendió a utilizar su ingenio para adaptarse y manejar su ambiente. Las necesidades agrícolas de las culturas que florecieron en Egipto y Mesopotamia, China y la India, al menos hace 5000 a. C., llevaron a diseñar diques y presas, cuyos restos aún pueden apreciarse en los márgenes de los correspondientes ríos. La construcción de canales para el riego, transporte y surtido del agua a las grandes metrópolis de aquel entonces confirma la relación directa entre el nivel de una civilización, y la posesión de una tecnología para mantenerla; en particular, la relación con el agua. En forma paralela a las obras hidráulicas a gran escala se desarrollaron artefactos, instrumentos y curiosidades asociadas al comportamiento de los fluidos. Es posible suponer que el ser humano intuía algunos principios básicos, si consideramos su notable conocimiento empírico. Tal es el caso del uso del fuelle, la jeringa y el sifón, como lo reflejan los legados pictóricos, y las estelas fragmentadas mismas que se conservan, y que muestran la existencia de la pipeta, la clepsidra y el reloj de agua usado en Babilonia y posteriormente en Egipto. Los portentos exhibidos en los templos egipcios para mantener la fe, y mostrar el beneplácito de los dioses o dejar de ver la ira divina, se lograron utilizando mecanismos hidráulicos ocultos, empleando aire o agua como fluidos; elevar objetos, desplazarlos con ingenio y desaparecerlos, fue una práctica tan desarrollada hacia los cultos a Ra.

Debido a que las primeras civilizaciones (China, Egipto y Mesopotamia), habitaron en regiones muy distintas, enfrentaron un problema semejante debido a que fueron civilizaciones agrícolas: ¿Cómo aprovechar el agua de los ríos junto a los cuales se asentaron?. Contener las aguas de esos caudalosos ríos, cuyos desbordamientos eran frecuentes, impulsó a los habitantes de esas regiones a tareas colectivas de gran esfuerzo, como construir diques canales y presas, entre otras obras. El objetivo de estos trabajos era controlar las inundaciones y almacenar el vital líquido. Este hecho fue muy importante, pues de él dependió que lograran desarrollar la agricultura, que les permitía asegurar su subsistencia. Los egipcios, por ejemplo, crearon un ingenioso método para regar sus sembradíos, para esto edificaron diques que impedían la inundación de los poblados, y que servían para contener el agua hasta que tuvieran la fuerza suficiente para que al liberarla corriera hasta los surcos y los deposito de líquido más alejados. Figura 1.1. También crearon un sistema de palancas, que funcionaba como una bomba de agua, a través del cual llenaban un recipiente con agua de río, y luego lo vaciaban a los canales de riego. Tal es el caso del shaduf: una larga pértiga que servía de gran ayuda para extraer el agua de los ríos y canales, mediante un sistema de contrapesos (3000 a. C). Figura 1.2.

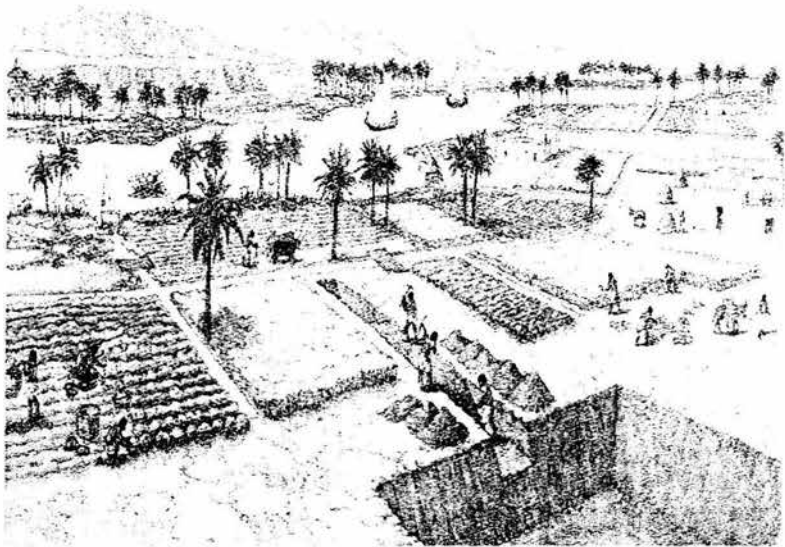


Figura 1.1 Los antiguos canales y diques construidos por los egipcios.



Figura 1.2 El Shaduf o bomba de agua

Para evitar los efectos del desbordamiento, previendo las crecidas anuales del Nilo, los egipcios también crearon un método que consistía en medir los niveles del agua en distintos puntos del río. Esto les permitía conocer con anticipación si las crecidas serían escasas o abundantes, y así tomar las debidas precauciones, para evitar los desastres que pudieran ocasionar alguna inundación o sequía. Tal es el caso los famosos nilómetros, pozos o escaleras, donde se podían establecer las medidas o los registros de las crecidas anuales provocadas por el río Nilo. Figura 1.3.



Figura 1.3 Nilómetro pozo o escalera.

Los egipcios también podían determinar por medio de sus antiguos libros que hablaban acerca del tiempo, las inundaciones o las embarcaciones de tipo fluvial, como la que se muestra en la siguiente figura, y que es un fragmento del libro de los muertos, que muestra tres embarcaciones de tipo fluvial.



Figura 1.4 Libro de los muertos

Muchas de las ciudades de la antigüedad tuvieron un gran esplendor, pues contaban con enormes palacios, templos monumentales, avenidas amplias y bellos jardines. Tal es el caso de los jardines colgantes de Babilonia.



Figura 1.5 Los jardines colgantes de Babilonia.

Un denominador común en todas las civilizaciones fue la búsqueda del uso óptimo de los recursos hídricos. La ingeniería hidráulica estuvo estrechamente relacionada con la aparición de las primeras civilizaciones. Un ejemplo de ello, que aún pervive, lo tenemos en el antiquísimo y complejo sistema de irrigación del Bali, el cual era muy utilizado y manejado por los antiguos sacerdotes egipcios. Figura 1.6.



Figura 1.6 El Bali o sistema de riego

De igual forma, los chinos y los mesopotámicos idearon técnicas que les permitieron utilizar adecuadamente este recurso natural; esto les permitía obtener beneficios para la agricultura, a partir del riego que provocó un cambio tan fundamental en la organización social y política de los pueblos de la antigüedad. En la siguiente figura, se ilustra una solución que los chinos idearon en relación con el problema del agua para los regadíos. Para esto construyeron y utilizaron una bomba de cadena, y que probablemente ellos inventaron en el siglo III a. C.

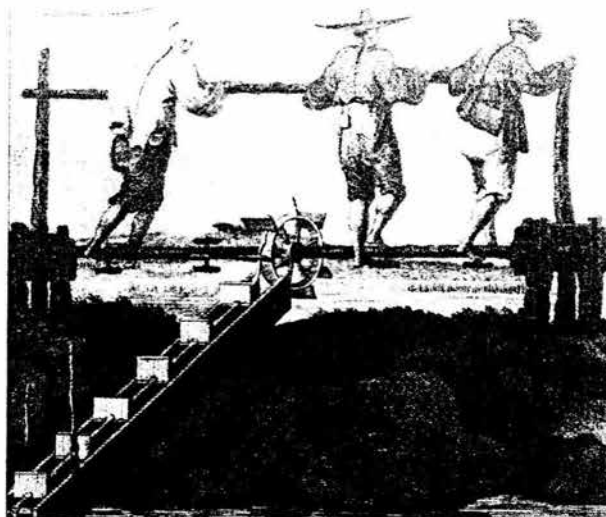


Figura 1.7 Bomba de cadena inventada por los chinos en el siglo III a. C.

Los cambios y avances importantes que modificaron cualitativamente el conocimiento de la mecánica de los fluidos se llevaron en forma paralela a los cambios sociales de la humanidad. La palabra hidráulica se entiende de algún modo como el uso directo del agua, para beneficio de la humanidad, entonces está práctica debe ser considerada como la técnica más antigua que fue utilizada por el hombre en las primeras etapas de la evolución histórica de la mecánica de los fluidos, denominada de la supervivencia.

1.3 EL PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES

Uno de los grandes científicos de la antigüedad, considerado como genio, y famoso por sus aportaciones a la mecánica de los fluidos fue **Arquímedes (287 – 212 a. C)**. En el área de los fluidos, se le acreditan los principios básicos de la hidrostática y de la flotación de los cuerpos, así como la invención y el perfeccionamiento del tornillo – sin – fin (cóclea), con el que se podía bombear el agua.



Figura 1.8 Arquímedes
(287 – 212 a. C)

Arquímedes distinguido filósofo, físico, matemático e inventor de origen griego, es considerado como el científico más importante de su época, y uno de los matemáticos más brillantes de toda la historia. Nació en el año 287, del siglo III a. C., en Siracusa Sicilia (una ciudad griega situada al sur de Italia). Su padre fue un distinguido astrónomo de nombre **Fidias (324 – 250 a. C)**, descendiente de los antiguos reyes de la ciudad, y pariente del rey Heron II. Su madre en cambio, al parecer fue una esclava. En los primeros años de su vida se educó en compañía de su padre, poco tiempo después se dirigió a Alejandría de Egipto (por entonces el mayor centro cultural existente en virtud de dos instituciones, el Museo y la Biblioteca, erigidas por el rey Tolomeo I, y realmente fue en esta etapa de su vida, donde adquirió una sólida formación en matemáticas, y un enorme interés por las ciencias exactas), para completar su

formación científica. Durante su estancia en Egipto, tuvo por maestro a Conon de Samos (280 – 220 a. C), gran matemático y discípulo de Euclides (325 – 265 a. C). En la siguiente figura, se ilustra la Biblioteca de Alejandría de Egipto, tal y como se imagina que pudo ser.

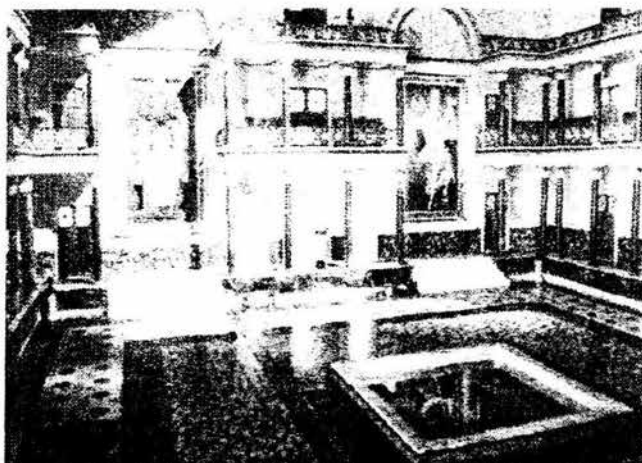


Figura 1.9 La Biblioteca de Alejandría en Egipto, erigida y fundada por el rey Tolomeo I, en el año 290 a. C.

Concluidos sus estudios, Arquímedes vuelve a Siracusa, aunque después regresa a Egipto, para realizar obras de ingeniería tendientes a regular las aguas del río Nilo. Durante este periodo de tiempo, se cree que perfeccionó su famoso tornillo – sin – fin, (cóclea), con el que se podía bombear el agua (250 a. C).

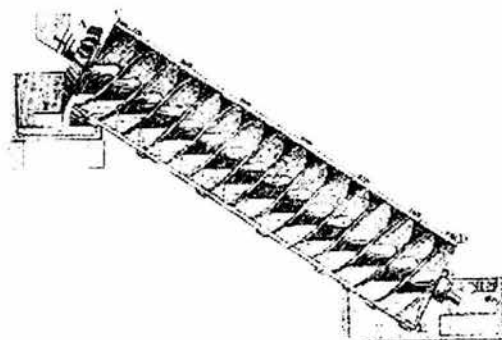


Figura 1.10 El famoso tornillo – sin – fin , atribuido al gran sabio Arquímedes (250 a. C).

En la figura 1.10, se ilustra el tornillo – sin – fin, atribuido a Arquímedes, el cual se empleaba para elevar el agua de los pozos, así como en obras de riego, y en algunos otros casos para extraer el agua de las minas, no sólo en Siracusa, sino también en otras ciudades. Dicho dispositivo hidráulico estaba conformado por una rosca y un tubo hueco alineado (a través del cual fluía el agua), y varios engranes. Parece ser que el verdadero inventor del tornillo sin fin, fue el griego **Arquitas de Tarento (430 – 360 a. C)**; a él se le debe también el invento de la polea, pero es Arquímedes, al que se le atribuye el perfeccionamiento del tornillo, ya que lo llegó a utilizar para bombear el agua. De vuelta en Siracusa, Arquímedes se dedica al estudio de las matemáticas y a la mecánica; además, logra construir grandes máquinas, así como naves de guerra. Entre algunas de sus aportaciones matemáticas destacan algunos tratados sobre: esferas, cilindros, espirales y cuerpos flotantes.

Arquímedes fue el primer científico que utilizó y construyó un sistema de poleas, para desplazar grandes pesos, por medio de la acción de fuerzas pequeñas. Se cuenta que una ocasión, para demostrar la eficacia de este dispositivo mecánico (sistema de poleas), preparó una espectacular demostración de tipo experimental; utilizó un barco de la flota real, el cual fue desalojado del agua, con gran esfuerzo, por un grupo de soldados y colocado sobre la arena de la playa. Una vez fijado este sistema de poleas al barco, Arquímedes invitó al rey Hierón, y le pidió a que tirase del extremo libre de la cuerda. Sin realizar un gran esfuerzo, el rey Hierón logró arrastrar por cuenta propia el barco sobre la arena, lo que provocó una gran sorpresa del rey, e hizo aumentar todavía más el prestigio de Arquímedes ante este. De igual forma, durante el curso de estos estudios, estableció la ley del equilibrio de las palancas. Es muy celebre y conocida su frase:

“Dadme una palanca y un punto de apoyo, y moveré al mundo”.

Por esa misma época, también resuelve el problema de la corona del rey Hierón, develando el fraude del orfebre que había sustituido una parte de oro por otra de plata, y con motivo de ello descubre el principio que lleva su nombre. Hierón I, rey de Siracusa (Sicilia), deseaba saber si su corona contenía oro en la proporción adecuada. La solución la encontró Arquímedes, se cuenta que una ocasión, cuando Arquímedes se disponía a bañarse en un baño público, observó que el nivel del agua en la bañera se incrementaba, a medida que él se iba introduciendo en ella, y pensó en ese momento, que así podría resolver el problema que le preocupaba. Figura 1.11.



Figura 1.11 Baño público al que entró Arquímedes, en el que llevó a cabo su famoso experimento del principio básico de la flotación de los cuerpos.

Entusiasmado, por tan brillante descubrimiento, Arquímedes salió corriendo en dirección hacia su casa, completamente desnudo, y gritando por las calles; **“¡Eureka!”** (**“¡Lo descubrí!”**). Apenas llegó Arquímedes a su casa, sumergió en agua, pesos de oro y plata iguales, determinando los desplazamientos de agua respectivos. Al comparar éstos con el desplazamiento que generaba la corona, determinó el porcentaje de cada metal por medio de una sencilla regla de tres. Como resultado de estos hechos, Arquímedes logró resolver el problema de la corona del rey Hierón, y dar validez a su principio (255 a. C), el cual dice:

“Todo cuerpo sumergido en un fluido recibe un empuje vertical hacia arriba, igual al peso del volumen del fluido que desaloja”.

Este es el principio fundamental de la hidrostática, el cual relaciona los principios básicos de la flotación de los cuerpos. La verificación experimental de su validez, se lleva a cabo, mediante la balanza hidrostática. Cabe mencionar que de las diez obras que se conocen de Arquímedes, sobresalen sus dos obras sobre: la hidrostática y la flotación.

El principio de Arquímedes, presenta algunas aplicaciones de uso frecuente, para el caso de los famosos areómetros o densímetros, los cuales se emplean para medir la densidad de los líquidos. Cuando un cuerpo sólido se sumerge en un líquido sufre una aparente pérdida de peso, igual al peso del líquido desalojado. Al establecerse un equilibrio entre el peso del cuerpo, y la fuerza debida al peso del líquido desalojado, el cuerpo flota; es por ello que resulta más conveniente que mientras menos denso sea el líquido en el que flota un cuerpo, más se sumergirá, puesto que la menor densidad del líquido tiene que compensarse con un mayor volumen desalojado para que el empuje ascendente, que es lo que permite que los cuerpos floten, sea igual al peso del cuerpo. Tomando como base estas ideas, el principio de Arquímedes se puede expresar de la siguiente forma; *Fuerza de flotación = peso del fluido desplazado*

En la siguiente figura, se puede apreciar un areómetro o densímetro, el cual esta conformado por un flotador con graduación y un contenedor de líquido.

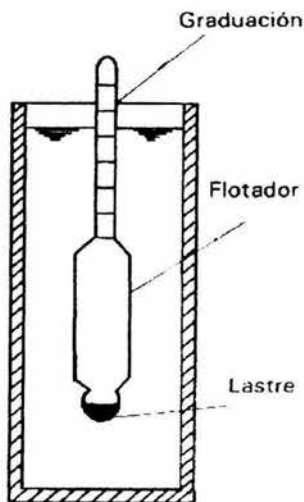


Figura 1.12 Aerómetro

Un factor muy importante que se debe tomar en cuenta para el caso de la flotación de los cuerpos, es que debe de haber una diferencia de densidades, para que los cuerpos floten. Para el caso del areómetro se tiene la siguiente relación:

$$\Delta\rho = \rho_{sol} - \rho_{H_2O}$$

Otras aplicaciones del principio de Arquímedes, se tienen para el caso de la flotación de los barcos, la flotación de los globos meteorológicos de altura fija, y la proporción de oro en un anillo de bodas (aunque las condiciones son más difíciles de prever). Del principio de Arquímedes, se deduce que cuando sumergimos un cuerpo sólido (cualquiera), en un líquido, comprobamos que éste ejerce sobre el cuerpo una fuerza de sustentación, es decir, una fuerza dirigida hacia arriba que tiende a impedir que el cuerpo se hunda en el líquido. Tal fuerza, que es vertical y está dirigida hacia arriba, se denomina empuje ascendente del líquido sobre el cuerpo. En la siguiente figura, se ilustra un cuerpo sólido sumergido en un fluido, y por lo tanto las fuerzas que actúan en él hacia arriba, son mayores que las fuerzas dirigidas hacia abajo; empuje ascendente.

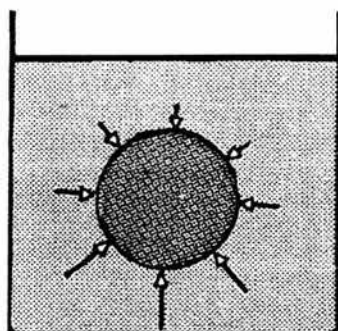


Figura 1.13 Empuje ascendente (E>P) que recibe un cuerpo al sumergirse en un fluido.

En mecánica de fluidos, existe ahora, un número adimensional que lleva el nombre de Arquímedes, y es comúnmente conocido como **el número de Arquímedes**. Dicho número relaciona un cociente entre la fuerza gravitacional, y una fuerza debida a los efectos de viscosidad (fricción interna); además, interviene en muchas aplicaciones de transferencia de momentum, flotabilidad de sólidos y fluidización. También indica debido al movimiento de los sólidos, el valor de la densidad de las partículas, y en honor al gran matemático de la antigüedad (Arquímedes), a dicha relación se le conoce con ese nombre. Este número adimensional, es normalmente definido de la siguiente forma:

$$Ar = \frac{d^3 \cdot (\rho_s - \rho) \cdot \rho \cdot g}{\mu^2}$$

Donde: Ar ; es el número de Arquímedes

d^3 ; es el diámetro de la partícula

ρ_s ; es la densidad del sólido (partícula)

ρ ; es la densidad del fluido

g ; es la fuerza de gravedad

μ ; es la viscosidad del fluido.

El número de Arquímedes, también se utiliza para el caso de flujo de fluidos a dos fases, tal como sucede con las mezclas de líquidos y sólidos, y de gases y sólidos. Por ejemplo, si una partícula de sólido cae bajo los efectos de la fuerza de la gravedad, alcanza una velocidad máxima de caída llamada velocidad terminal (véase biografía de Stokes). Si el régimen de caída es laminar, es decir, ($Re < 0.2$), la velocidad esta dada por la ley de Stokes. Ahora para el caso contrario, **si el régimen no es laminar**, se requiere del uso de éste número adimensional; **número de Arquímedes**.

Dicho número es una función que depende del número de Reynolds, y del número de Lyaschenko, el cual puede obtenerse mediante el uso de tablas. El número de Lyaschenko (Ly), se define de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Ly = \frac{u^3 \cdot \rho^2}{\mu \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g}$$

Una vez calculado el número de Lyaschenko, se procede a obtener el valor de la velocidad terminal, con la siguiente ecuación:

$$ut = \sqrt[3]{\frac{Ly \cdot \mu \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g}{\rho^2}}$$

Para una partícula de forma irregular, la velocidad de sedimentación se determina por el mismo método a partir del número de Lyaschenko, pero introduciendo en el número de Arquímedes el diámetro equivalente (d_{eq}), en vez del diámetro (d). El diámetro equivalente de una partícula de forma irregular se calcula como el diámetro de una esfera cuyo volumen (V), es igual al volumen del cuerpo irregular:

$$d_{eq} = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi} \cdot V} = 1.24 \sqrt[3]{\frac{m}{\rho}}; m = \text{masa}$$

En la siguiente figura, se ilustra un diagrama de cálculo para determinar el número de Arquímedes, en función de los números de Reynolds y Lyaschenko, el cual es muy útil, para la sedimentación de partículas unitarias en un medio inmóvil; *partículas esféricas, redondeadas, angulares, oblongas y laminares*.

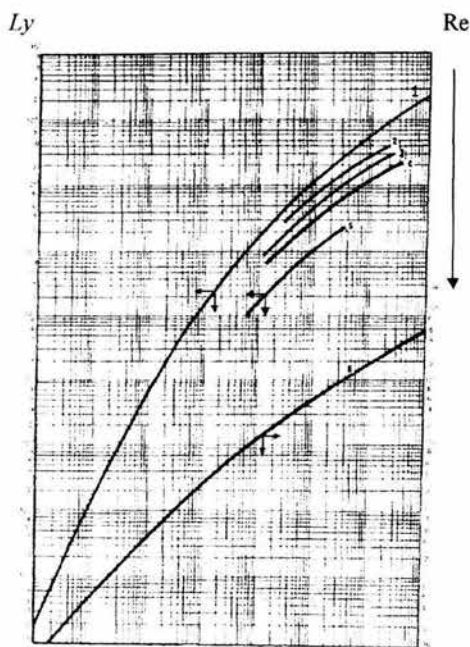


Figura 1.14 Diagrama de cálculo (Ar).

Algunas otras aportaciones matemáticas con las que contribuyó Arquímedes, para el desarrollo de esta ciencia exacta, fueron: el cálculo de π , para la medición de los polígonos regulares inscritos y circunscritos, el estudio de los sólidos generados por la rotación de las cónicas alrededor de sus ejes, el cálculo de las áreas de la esfera y del cilindro. De igual forma, también dedujo las expresiones de los volúmenes del cono y de la esfera, y determinó la posición del centro de gravedad de los conos circulares. También demostró que el volumen de una esfera es dos tercios del volumen del cilindro que la circunscribe. Con el resultado de estos estudios, Arquímedes, se anticipó a muchos de los descubrimientos de la ciencia moderna, tal es el caso del cálculo integral. Así mismo, se le acredita un método de cálculo para determinar el área de un segmento de la parábola; utilizó el llamado procedimiento de "exhauciones", el cual se basa en propiedades especiales de la parábola. En el campo de la física, también se le acreditan algunos otros estudios, sobre la estática de los sólidos, en relación con su teoría del centro de gravedad.

Años más tarde, al ser Siracusa atacada por los romanos, durante la segunda Guerra Púnica, se le confía a Arquímedes la defensa de la ciudad, y gracias a su ingenio y a la construcción de máquinas militares (catapultas), consigue rechazar por tres años los ataques romanos. Durante ese periodo de tiempo, también se le acredita al gran filósofo, el diseño de unos espejos, los cuales incendiaban las embarcaciones enemigas de los romanos al enfocarlos con los rayos del sol. Figura 1.15.

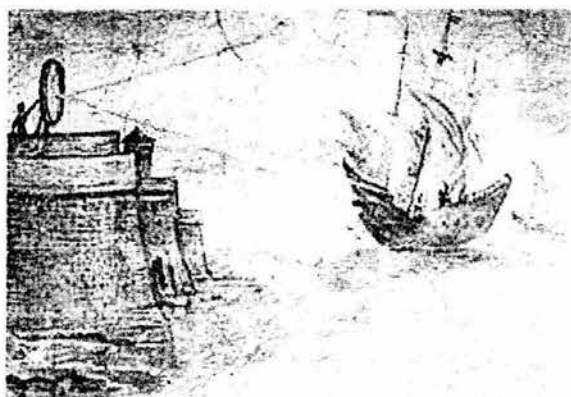


Figura 1.15 Sistema de espejos que incendiaban las embarcaciones enemigas de los romanos al enfocarlos con los rayos del sol.

Finalmente Siracusa fue conquistada por los enemigos romanos en el año 212 a. C., pero a pesar de que el general **Marcelo (280 – 209 a. C)**, había ordenado que se respetara la vida de Arquímedes, un soldado romano que no le reconoció lo mató en la toma de la ciudad. Cuenta la leyenda que Arquímedes estaba tan concentrado en sus operaciones matemáticas como para no advertir ni siquiera lo que pasaba a su alrededor, y lo último que le pidió al soldado fue que le permitiera terminar su cálculo y su dibujo. Figura 1.16.



Figura 1.16 Muerte de Arquímedes.

1.4 LA CONTRIBUCIÓN HISTÓRICA DE LOS INGENIEROS ROMANOS EN EL DESARROLLO DE LA MECÁNICA DE LOS FLUIDOS.

Los romanos fueron los grandes ingenieros de la antigüedad, ellos desarrollaron máquinas y mecanismos hidráulicos; no sólo empleaban el tornillo de Arquímedes para bombear el agua en la agricultura y minería, sino que también construyeron extensos sistemas de acueductos, algunos de los cuales todavía funcionan y proporcionan agua a las fuentes de Roma.

Diez acueductos suministraban el agua a la antigua ciudad de Roma, unos 140.000 metros cúbicos de agua al día aproximadamente. Es muy importante mencionar cual es el significado de la palabra acueducto, término latino que significa; conducción de agua. Cabe mencionar que el sistema de transporte de agua más extenso de la antigüedad fue el que construyeron los romanos. El primer acueducto que construyeron fue uno llamado *Aqua Apia*. Era un acueducto subterráneo de dieciséis kilómetros de longitud, y fue erigido durante el mandato de Apio Claudio (llamado el ciego), por lo cual se le llamó posteriormente Vía Apia, hacia el año 310 a. C. Uno de los primeros acueductos que transportaba el agua sobre la superficie del suelo era uno llamado *Aqua Marcia*, el cual construyeron los romanos en la antigua ciudad de Roma, y tenía una longitud de noventa kilómetros; además, fue mandado a construir por el pretor Marcio, hacia el año 144 a. C. La sección de este acueducto, soportada por puentes, medía aproximadamente unos dieciséis kilómetros de longitud. En el siglo 1 a. C., el arquitecto e ingeniero romano; **Marco Lucio Vitrubio (70 – 25 a. C.)**, describió en detalle el funcionamiento de la rueda hidráulica horizontal, y fue de gran avance para los romanos, ya que sirvió para revolucionar la técnica de molienda de grano.

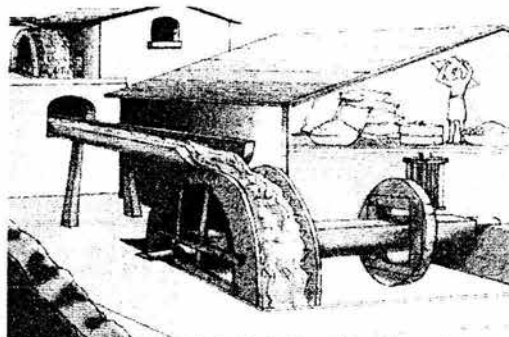


Figura 1.17 Rueda hidráulica ó molino de agua que utilizaron los romanos para moler el trigo.

En la figura 1.17, se ilustra un molino de agua o rueda hidráulica que utilizaban los romanos como fuente de energía. Esta rueda era una de las más comunes en aquella época, y se accionaba cuando era sumergida parcialmente en una corriente de agua que la hacía girar, cuyo impulso era recogido a través de un eje horizontal, que conectado a una rueda de madera, se transmitía a otro vertical, el cual accionaba una piedra del molino. Los ingenieros romanos tenían más en común con sus colegas de las antiguas sociedades de Egipto y Mesopotamia, que con los ingenieros griegos sus predecesores. Los romanos utilizaron principios simples, el trabajo de los esclavos y tiempo para producir mejores prácticas para el beneficio del imperio romano. Sin embargo, en comparación con los griegos, las contribuciones romanas a la ciencia fueron limitadas, pero si abundaron en soldados, dirigentes, administradores y juristas notables. En su mayor parte, la ingeniería romana era civil, especializada en el diseño y construcción de diversas obras de tipo civil e hidráulico, tales como; *acueductos, puentes y edificios públicos*.

Desde la fundación de Roma en el año 753 a. C., los romanos ya utilizaban el agua que venía del Tiber, y a partir de ese momento tuvieron la necesidad de almacenar el agua, y construyeron entre otras obras el Pantano de Proserpina para suministrar el agua a Mérida (Emérita Augusta), la capital de Lucitania, una de sus provincias de Hispania. De igual forma, trataron de armonizar los diferentes condicionantes necesarios para establecer y mantener en su funcionamiento una ciudad, y el agua representaba para ellos una de estas condicionantes. En aquel tiempo las ciudades se construían en donde había agua, y cuando esta se agotaba o no era suficiente se tenía que ir a buscar en otras partes. Esto llevó a la creación de una red de canales que hoy en día nos sorprende y maravilla. De las diferentes técnicas posibles para canalizar el agua, los tramos de acueductos construidos sobre puentes de arcos son una de las obras más espectaculares del legado romano. Cabe mencionar que los antiguos romanos conocían el principio de los vasos comunicantes, al menos en su uso empírico; además eran muy buenos constructores, puesto que ellos fueron los que inventaron el cemento.

Casi todo lo que se sabe actualmente del sistema romano de distribución de aguas proviene del libro; *"De Aque Urbis Romae Libri II"*, de Sextus Julius Frontinus (40 – 103 d. C.). Un ingeniero romano que escribió sobre los conocimientos hidráulicos de sus compatriotas (97 d.C.), y que impulsó a los ingenieros romanos a la construcción de acueductos como los que todavía subsisten en España y Francia.



Figura 1.18 Sextus Julius Frontinus
(40 – 103 d. C.)

Sextus Julius Frontinus distinguido ingeniero hidráulico y gobernante de origen romano, nació en el año 40 d. C., en Toscana, cerca de la Provincia de Galia Narbonense en Italia. Era un aristócrata de la familia Julia y miembro de la clase senatorial. Fue pretor, tres veces cónsul y general en Gran Bretaña. En los primeros años de su vida se educó en compañía de sus padres, poco tiempo después comenzó su carrera como soldado militar, y en el año 70 d. C., fue nombrado "pretor urbanus". Tres años más tarde llegó a ser cónsul; en este puesto fue responsable de la administración y mando de algunos negocios militares, así como de la coordinación de algunas campañas militares. En el año 74 d. C., fue nombrado gobernador de Gran Bretaña, y durante su mandato se encargó de controlar el imperio y de la administración de las fuerzas armadas; puesto que desempeñó hasta el año 77 d. C. Para el año 85 d. C., fue nombrado procónsul; sin embargo, después de este puesto, no volvió a ocupar ningún otro cargo político durante los próximos diez años. Durante este periodo de tiempo se dedicó por completo a escribir y a publicar algunos otros trabajos sobre; las cuestiones militares en relación con la agrimensura de tierra. Años más tarde, fue nombrado curator aquarum; en este puesto se encargó de la administración de los sistemas de distribución de agua en Roma. Como ya se dijo, una de sus mejores publicaciones fue un libro titulado:

"De Aque Urbis Romae Libri II"

En este libro, Frontinus describe y muestra como los antiguos romanos manejaban el agua mediante acueductos, canales y cloacas, así como algunos otros sistemas de distribución de agua construidos por los romanos. Y como resultado de estos hechos fue el más conocido y famoso administrador de los acueductos de Roma, distinguiéndose como uno los mejores ingenieros de aquella época. Cabe mencionar que Frontinus llevaba varios registros sobre la utilización del agua, los cuales indicaban que el emperador utilizaba el 17%, el 39% se usaba en forma privada, y el 44% se usaba en forma pública. También se ocupó de las ciencias bélicas, y nos dejó otra de sus obras, mejor conocida como: **“Stratagematon Libri IV”**. En este libro, Frontinus describe y muestra las artimañas bélicas de las campañas militares. Finalmente durante el reino de Nerva, se inició un nuevo periodo en la vida de Frontinus, ya que fue el primero en haber sido electo para una comisión a cargo de reducir el gasto publico. De igual forma, también llegó a ser cónsul iterum en 98 d.C., y tertum en 100 d. C. Murió en el año 103 d. C., en Toscana cerca de la ciudad de Florencia en Italia, a sus 63 años de edad.

Es muy importante mencionar que desde los tiempos de los romanos, las tomas de agua ya eran un problema. Los acueductos se construyeron siguiendo esencialmente el mismo diseño que ellos usaban en arquitectura, es decir, con arcos semicirculares de piedra montados sobre una hilera de pilares. Cuando un acueducto cruzaba una cañada, con frecuencia requería niveles múltiples de arcos. En las figuras 1.19 y 1.20, se pueden apreciar algunos de los acueductos que todavía subsisten en la actualidad. Tal es el caso del acueducto romano de Segovia en España, así como el de Nimes en Francia.



Figura 1.19 Acueducto romano de Segovia en España.



Figura 1.20 Acueducto romano de la ciudad de Nîmes (Francia), diseñado con arquitectura de triple arcada.

Los acueductos romanos eran grandes canales, y estaban contruidos a partir de una mezcla de cemento que preparaban los antiguos romanos, con cenizas volcánicas y mortero de cal; además, estaban recubiertos con grandes losas de piedra a prueba de agua. De igual forma, mantenían una inclinación constante con respecto al suelo, ya que transportaban el agua hasta las grandes urbes de Roma, que recogían desde las colinas circundantes. Para que el agua tomara presión, esta se almacenaba en grandes depósitos de agua contruidos junto a los manantiales. Cuando el agua llegaba hasta el centro de Roma, esta se distribuía a las fuentes y edificios públicos, por medio de cañerías de plomo, terracota o madera. Cabe mencionar que una vez que el agua era transportada hasta las grandes urbes, esta se tenía que potabilizar. Esta labor se realizaba en diferentes etapas, mediante un filtrado de arena, y un decantado en terrazas escalonadas. Para esto, los romanos separaban el agua de mejor calidad que era utilizada para beber y cocinar, del agua que servía para regar o limpiar.

Otra de las obras de ingeniería que también contruyeron los antiguos romanos fue el uso y manejo de la Cloaca Máxima. Este sistema funcionaba como un auténtico sistema de alcantarillas, y estaba recubierta por una bóveda de ladrillos que recorría prácticamente toda la ciudad de Roma. Dicho conducto era de tipo subterráneo y transportaba las aguas residuales o de desecho hacia el río Tiber. Figura 1.21. Un aspecto que es muy importante mencionar es que muchas técnicas de ingeniería hidráulica que desarrollaron los antiguos ingenieros romanos, fueron fielmente transmitidas al Imperio Oriente y al mundo árabe, quienes se encargaron de perfeccionarlas.



Figura 1.21 Cloaca máxima o sistema de alcantarillado romano, muy utilizada para el transporte de las aguas residuales.

Los antiguos romanos utilizaron tubería de plomo, pero luego comenzaron a sospechar que no era adecuado para la salud ese material. Sin embargo, el envenenamiento por plomo no se diagnosticó específicamente hasta que el científico norteamericano Benjamín Franklin (1706 – 1790), escribió una carta relativa a su uso, en el año de 1768. Finalmente ya para concluir con la historia de la ingeniería romana en la antigüedad, se dice que declinó después del año 100 d. C., y sus avances fueron modestos.

1.5 HERÓN DE ALEJANDRÍA Y SUS APORTACIONES A LA MECÁNICA DE LOS FLUIDOS.

Otro de los científicos de la antigüedad, que también es considerado importante por sus aportaciones a la mecánica de los fluidos fue **Herón de Alejandría (65 – 125 d. C.)**. En el área de los fluidos, se le acreditan un gran número de estudios e investigaciones, sobre el empleo del aire comprimido en relación con varios fenómenos de tipo neumático, tales como: *sifones*, *chorros* y *fuentes*. De igual forma, empleó el aire comprimido para la construcción de máquinas bélicas. También se le acredita la invención de la primera máquina de vapor: *la Eolípila*.



Figura 1.22 Herón de Alejandría (65 – 125 d. C.).

Herón de Alejandría distinguido filósofo, físico, matemático e inventor de origen griego, es considerado como el científico más importante de su época, y uno de los primeros fundadores de la escuela de matemáticas de Alejandría. Nació en el año 65 d. C., en Alejandría de Egipto. Sus escritos más antiguos son una compilación del pensamiento de antiguos filósofos griegos. Los trabajos más importantes de este científico versaban sobre; neumática y mecánica. Dichos trabajos incluían cerca de 80 invenciones ingeniosas tales como: sifones, fuentes y máquinas de tipo mecánico, las cuales incluían según Herón de Alejandría, la concurrencia de los cuatro elementos fundamentales del

universo; *aire, agua fuego y tierra*. Cabe mencionar que en uno de sus libros sobre el tratado de neumática, describe muchos artefactos de tipo mecánico, así como algunos otros trucos mágicos. También incluye la primera sugerencia de una máquina de vapor; la eolípila.



Figura 1.23 La primera máquina de vapor (la eolípila), propuesta en el siglo 1. d. C.

En la figura 1.23, se ilustra la primera máquina de vapor (la eolípila), propuesta por Herón de Alejandría en el siglo 1 d. C. Esta máquina estaba conformada por dos tubos, los cuales eran conectados a una esfera llena de agua. Una vez que el líquido hervía, dentro de la máquina, el vapor generado comenzaba a escapar por los tubos y hacía girar la esfera. Otro de sus inventos más famosos fue la fuente que lleva su nombre (fuente de Herón).



Figura 1.24 Fuente de Herón

En la figura 1.24, se ilustra la fuente de Herón, en donde el flujo de agua o chorro de agua es producido mecánicamente por el efecto del aire comprimido. El flujo de agua dentro del contenedor o recipiente, impulsa el aire hacia afuera a través de un pequeño tubo doblado, y el aire burbujeando sobre la taza de agua que esta encima de la fuente, suena como el cantar de un pajarillo. También se le acredita a este genio el invento del sifón. Figura 1.25.

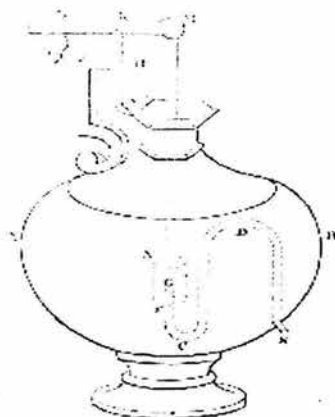


Figura 1.25 Sifón de agua.

Entre algunas de las aportaciones matemáticas con las que contribuyó Herón de Alejandría, al desarrollo de esta ciencia exacta, sobresalen: varias soluciones algebraicas de las ecuaciones de primer y segundo grado, así como el cálculo de las raíces cuadradas y cúbicas, así mismo estableció que el área de un triángulo es función de la longitud de sus lados. Algunos otros estudios de Herón de Alejandría, versaban sobre: óptica (en particular, sobre las propiedades y las leyes de la reflexión), geometría, trigonometría, astronomía y geodesia. Finalmente el gran científico e inventor de la antigüedad, Herón de Alejandría. Murió en el año 125 d. C., en Alejandría de Egipto, a sus 60 años de edad.

1.6 LAS CULTURAS PREHISPÁNICAS EN AMÉRICA COMO CONTRIBUCIÓN HISTÓRICA DEL DESARROLLO DE LA MECÁNICA DE LOS FLUIDOS.

En América los grandes imperios aztecas, mayas e incas, se esforzaron para llevar el agua potable a sus ciudades. Así el desarrollo de la agricultura como las necesidades de distribución del agua hacia las grandes urbes, requirieron del uso de acueductos y de canales de riego para sus campos, a través de montañas, selvas y desiertos.

1.6.1 LA CULTURA AZTECA

Los aztecas fueron un pueblo de origen náhuatl, que sucedieron y vencieron a otros pueblos de ese mismo origen, como los chichimecas, toltecas y tepanecas. Fundadores de la ciudad de Tenochtitlán (México Antiguo), cuyo nombre significa; "**Lugar de las garzas**". Otra interpretación del nombre lo hace derivar de Aztlán ("tierra blanca"), del lugar del que procedían, en el norte de la actual República Mexicana. Esta cultura floreció hacia el año 1325 – 1521 d. C., y luego de varios desplazamientos, los aztecas llegaron al lago de Texcoco. Hacia el año de 1325 d. C., comenzaron a habitar un islote que más tarde sería su gran capital; **Tenochtitlán**.

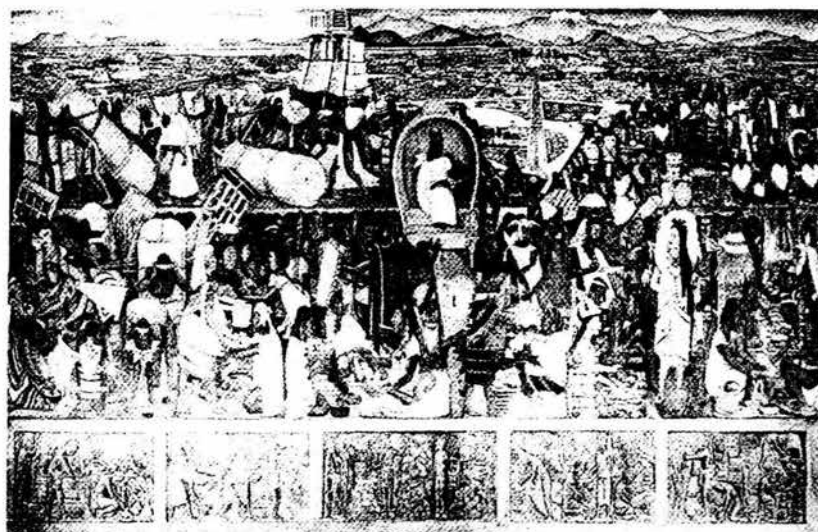


Figura 1.26 La gran Tenochtitlán.

Los aztecas conservaron muchas técnicas y tradiciones, así como creencias del pasado cultural anterior a ellos; además, fueron un pueblo de origen guerrero y lograron organizar un gran estado. Ellos desarrollaron una agricultura muy avanzada, tal es el caso de las chinampas, los jardines flotantes y las islas artificiales formadas con lodo amontonado, a las cuales se fijaban una gran cantidad de hierbas y arbustos. Entre estas islas circulaba el agua a través de los canales. Esta era una forma de agricultura muy intensiva, lo que permitía obtener hasta tres cosechas anuales.

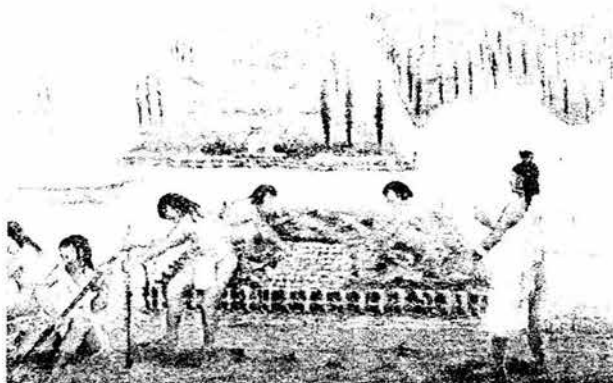


Figura 1.27 Chinampas que utilizaron los aztecas para el desarrollo de su agricultura.

En la figura 1.27, se ilustra una de las técnicas de riego y cultivo más sofisticadas que utilizaron los aztecas para el desarrollo de su agricultura; *las chinampas*. Sin duda este fue el sistema de mayor éxito, el cual consistía en rescatar zonas de cultivo en las partes bajas de los lagos, y para esto requirieron del uso y construcción de un armazón de postes y troncos, cuyo interior se rellenaba con tierra fértil hasta que se alcanzaba un nivel superior al de las aguas. Cabe mencionar que cada chinampa contaba con unas dimensiones aproximadas de diez metros de ancho por cien metros de largo. Para acceder a las chinampas se trazó una red de canales por donde circulaban las cosechas, y otros productos procedentes de los campos cultivados. Con este sistema se alcanzaron altísimos niveles de productividad, lo que permitía obtener varias cosechas anuales, entre las que destacan la cosecha de: **maíz, cacao, frijoles, algodón y tabaco**. Cultivar las parcelas era de carácter obligatorio, siendo que por este medio, impulsó a los aztecas a la construcción de sistemas de riego mediante canales, inundaciones y chinampas en los fondos de los valles, cuyas cosechas fueron complementadas por los productos obtenidos de la caza y la pesca en los lagos.

Los aztecas ampliaron y consolidaron los terrenos para la edificación y los unieron con el exterior mediante tres amplias calzadas y acueductos, los cuales conducían el agua pura a la ciudad. Muchos canales cruzaban la capital azteca, y por ellos transitaban miles de canoas. Cuenta la leyenda que el rey **Nezahualcóyotl (1402 – 1472)**, mandó a construir el albardón ó muro de represamiento que separaba las aguas dulces del lago de Xochimilco de las salobres del lago de Texcoco, y como resultado de este proyecto, se inició la construcción del primer acueducto que transportaba el agua dulce desde Chapultepec hasta el centro de la gran urbe. Esta es la obra de ingeniería hidráulica más representativa de los aztecas, además de las chinampas. Otro de los acueductos, que también fue famoso en esta cultura fue uno llamado; "Acuecuéxcatl", mandado a construir por el emperador *Ahuítzotl* (1439 – 1502).



Figura 1.28 El rey Nezahualcóyotl (1402 – 1472).

Nezahualcóyotl distinguido rey filósofo y poeta de origen chichimeca, nació en el año 1402 d. C., en Texcoco, su nombre significa "coyote de ayuno". Fue hijo de Ixtlixóchitl, señor de los chichimecas y de Matlalcihuatzin, hija del señor de Tenochtitlán; Huitzilíhuitl. En los primeros años de su vida se educó en compañía de sus padres, poco tiempo después recibió una educación de tipo privilegiado, ya que ingresó al palacio paterno. Mas tarde ingresó al Calmecac o escuela de estudios superiores. De esta forma, logró introducirse en el estudio de las doctrinas y la sabiduría heredada por los toltecas. Años mas tarde, se le

concedió el trono de rey, que era su derecho y obligación por nacimiento, y así comenzó a mostrar las primeras evidencias de sus notables conocimientos y habilidades. Su primer trabajo fue idear un código de leyes, el cual fue considerado tan ejemplar que fue utilizado y adaptado por los aztecas y los tlacopanos. Estas leyes se basaban en una división de poderes, las cuales creaban un extenso número de consejos incluyendo las guerras, las finanzas, la justicia y el llamado consejo de música, el cual también incluía ciencia, arte, literatura, poesía e historia. Consumado el dominio del valle de México en 1431, Nezahualcóyotl logra establecer la Triple Alianza entre; Texcoco, Tenochtitlán y Tacuba, y en ese mismo año es coronado rey; cargo que ocupó por más de cuarenta años. Durante su reinado reorganizó el gobierno y dictó las leyes que fortalecieron al Estado.

Como ya se dijo, uno de sus mejores proyectos fue la construcción del primer acueducto que transportaba el agua dulce desde Chapultepec hasta Tenochtitlán. Durante ese periodo de tiempo, también supervisó la construcción de algunas otras obras de tipo civil e hidráulico, entre estas: templos, palacios, diques y presas. Como resultado de sus bellos escritos, Nezahualcóyotl, es considerado un rey filósofo y poeta, ya que compuso numerosos cantos y poemas, de los cuales se conservan unos treinta, en donde planteaba numerosos problemas de carácter filosófico; la muerte, el enigma del hombre y su creador, así como el pensamiento conocido como la flor y el canto. En su honor un municipio del estado de México lleva su nombre. Murió en el año 1472, en el México Antiguo (Tenochtitlán), a sus 72 años de edad. En la siguiente figura, se ilustra un parte de un acueducto o sistema de saneamiento que todavía subsiste en las ruinas del Templo Mayor.



Figura 1.29 Acueducto de la cultura azteca.

En cuanto a su religión los aztecas eran politeístas, pues adoraban a muchos dioses e incorporaban a su religión la de otros pueblos que se sometían. El calendario azteca era el núcleo central de su religión; además, el culto estaba destinado a la adoración de los dioses, tan benéficos para la agricultura, a los cuales se les ofrecían regalos y sacrificios, entre ellos destacan; *Tláloc, dios de la lluvia y Huitzilopochtli, dios del sol, a quién los aztecas consideraban como su protector.* En el centro de la gran ciudad estaba el recinto sagrado, formado por decenas de templos y palacios, tal es el caso del Templo Mayor, en el que se rendía culto a estos dioses. En la siguiente figura, se ilustra uno de los códices más importantes de los aztecas, el cual denominaron con el nombre; **Borbónico**, y fue muy representativo para ellos, ya que representa a Tláloc (dios de la lluvia y de la agricultura), como una deidad para el agua o la lluvia.



Figura 1.30 Códice Borbónico que representa a Tláloc (dios de la lluvia y de la agricultura).

1.6.2 LA CULTURA MAYA

Los mayas fueron un pueblo de origen desconocido, y de carácter sedentario: posiblemente fueron una de las civilizaciones más importantes de Mesoamérica, ya que contaban con amplios conocimientos de astronomía y de matemáticas. Se supone que llegaron desde el Golfo de México, y se establecieron en Yucatán hacia el año 2500 a. C., y 500 años más tarde se hicieron agricultores. Los mayas ocuparon un extenso territorio comprendido por el estado de Chiapas, la península de Yucatán, gran parte de Guatemala, la zona de Belice, el norte de Honduras y una parte de la república de El Salvador. Los primeros agricultores mayas comenzaron a practicar la agricultura hacia el año 2800 y 2600 a. C., en la zona maya que comprende actualmente los estados de Yucatán, Campeche, Quintana Roo, Chiapas, Tabasco, Belice y Honduras. Este conocimiento se extendió por toda la región, y proporcionó a los mayas nuevos elementos para su alimentación, basada hasta entonces, en lo que obtenían de la caza, la pesca y la recolección.

Hacia el año 320 d. C., los mayas comenzaron a generar una cultura con características propias, a partir de un nivel cultural común a todos los pueblos de Mesoamérica (territorio comprendido entre los ríos; Pánuco, Moctezuma, Tula y Lerma etc). La economía del Imperio Maya, estaba basada en la agricultura consistente en el cultivo del maíz, cacao, tomate, frijol y algodón. La agricultura de milpa se hizo intensiva a través de la construcción de terrazas y de canales de riego, como en Edzna (Campeche), lográndose con estos sistemas, tres ó más cosechas al año. En la siguiente figura, se pueden apreciar algunas de las terrazas ó planicies que eran destinadas al riego, y que utilizaron los mayas para el desarrollo de su agricultura.



Figura 1.31 Planicie que era destinada al riego

Un aspecto que es muy importante mencionar es que la agricultura del maíz, era la base fundamental de la alimentación del pueblo maya, y esto hacia vínculo con su cultura, puesto que a partir de los conocimientos en astronomía, calendario y matemáticas, surgió la preocupación sacerdotal por conocer el paso de las estaciones, imprescindible para las cosechas y el buen cultivo. En cuanto a su religión, los mayas no tenían estrictamente una sola religión, puesto que eran politeístas y se adoraban a varios dioses. Algunas de estas creencias eran de tipo naturalistas; pues los dioses representaban a los cuatro elementos fundamentales de la naturaleza (aire, agua, fuego y tierra), así como a los fenómenos atmosféricos y a los cuerpos celestes. Otras creencias eran de tipo zomórficas y antropomórficas. Los primeros templos, dioses y sacerdotes, comenzaron a aparecer con el desarrollo de la agricultura sedentaria. Existieron varios dioses mayas, pero el más asociado a la agricultura, riego y distribución del agua, según las creencias de los mayas era el dios Chaac (dios de la lluvia y de la agricultura).

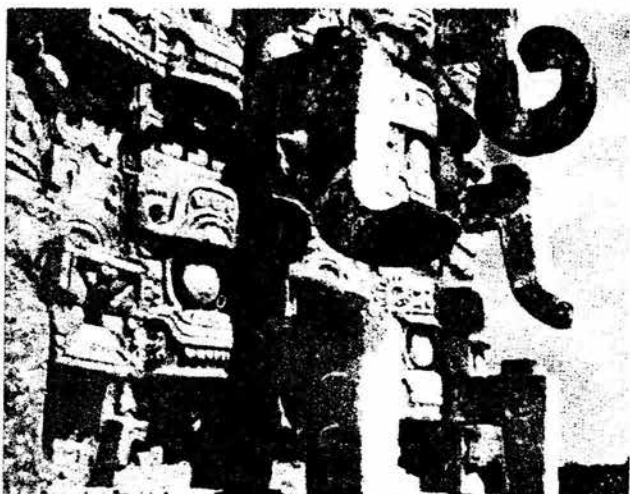


Figura 1.32 Fachada del templo de Kabah en Yucatán, que incluye algunas máscaras de Chaac (dios de la lluvia).

En la figura 1.32, se ilustra la fachada del templo de Kabah, en el estado de Yucatán, el cual incluye algunas máscaras del dios Chaac (dios de la lluvia y de la agricultura). Este dios era representado con una nariz muy parecida a una trompa, y con dos colmillos enrollados que salen de la boca, y que se dirigen hacia abajo.

Valiéndose de ideogramas, los mayas elaboraron una gran cantidad incalculable de libros y códices. Sin embargo, solo tres de ellos, han llegado hasta nosotros, pero el más importante en este caso, es el Códice Dresden. Dicho códice trata básicamente de astronomía, astrología, profecías del tiempo, así como de agricultura. También contiene alguna página sobre alguna inundación ó diluvio, como reseña ó profecía histórica, en relación al retorno cíclico de la temporada de lluvias, tan benéfica para la cultura maya.

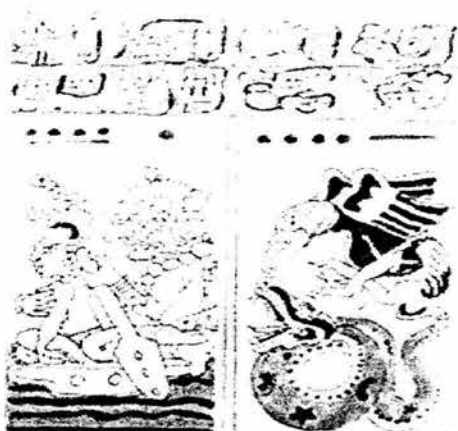


Figura 1.33 Códice Dresden de los mayas

En la figura 1.33, se ilustra el Códice Dresden de los mayas, en el cual aparecen la serpiente celeste y los símbolos de las constelaciones, así como los eclipses del sol y de la luna, con derramamiento de agua por todas partes. También contiene algunos otros cálculos (relativos), sobre el planeta Júpiter. Dicho códice fue elaborado con papel kopó (ahora conocido como papel amate), y se elaboraba a partir de la corteza del árbol de la higuera (*Ficus*); aunque también se utilizaban la piel del venado, así como el algodón y el papel del maguey, ningún otro material fue más utilizado que el papel kopó. Una fecha aproximada en que fue realizado este códice, se sitúa entre los años 1000 y 1200 d. C., (originario de Chichén Itza), y posiblemente todavía se encontraba en uso entre los mayas, cuando llegaron los conquistadores españoles. La navegación entre los mayas, es otro aspecto muy importante que conviene mencionar, ya que a pesar de que nuestras culturas prehispánicas, estuvieron aisladas de otros continentes, no significaba que no atravesaran los océanos, y es de esta forma, como existía la navegación entre las costas, ríos y canales construidos por ellos en el México antiguo. Este tipo de travesías marítimas, se realizaban primordialmente con fines comerciales.

Los mayas contaban con una amplia red de rutas marítimas que iban desde Veracruz hasta Honduras, y con sus canoas ellos navegaban a través de las costas, bahías y arrecifes.

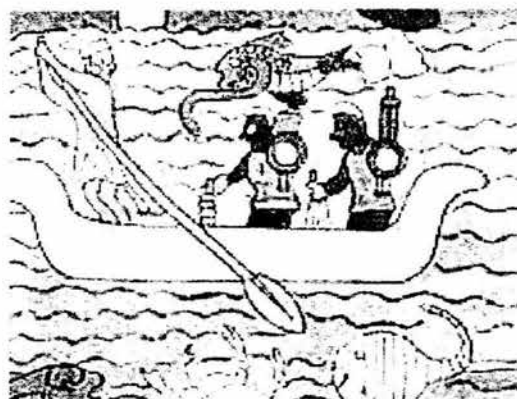


Figura 1.34 Los canales de los mayas utilizados para la navegación.

Los mayas tenían un buen conocimiento de los vientos, y de las corrientes dominantes de la zona del Caribe. Todavía existen evidencias de que mientras navegaban hacia Centroamérica, lo hacían cerca de la costa, para aprovechar determinadas corrientes que ahí se forman, y que se dirigen hacia el sur; además, como sus embarcaciones no resistían las turbulencias del mar abierto, procuraban mantenerse siempre cerca de la costa o en aguas bajas, como medida de protección. En cambio, durante el viaje de regreso lo hacían alejados de la costa, con la finalidad de aprovechar la fuerte corriente del Caribe (una de las más veloces del mundo), la cual fluye hacia el norte, y que más adelante a partir del canal de Yucatán, se conoce como; *Corriente del Golfo*. En la península de Yucatán, fueron comunes los puertos a orillas de estuarios, ríos y lagunas costeras; además, las rutas de viaje incluían señalamientos para apoyar a los navegantes e indicarles zonas peligrosas, por medio de diques e islotes artificiales, así como obras hidráulicas que ampliaban y mejoraban la red fluvial, tal es el caso de los canales que conectaban cuerpos de agua, que originalmente no tenían comunicación. Es muy importante mencionar que en los antiguos puertos de la península de Yucatán, todavía subsisten restos de muelles, murallas defensivas, diques, embarcaderos, señales de navegación, así como templos que construyeron los antiguos mayas a lo largo de los siglos, para hacer más seguras sus travesías. De igual forma, también construyeron acueductos, baños de vapor, fuentes y sistemas de saneamiento.

Otro aspecto que es muy importante mencionar, es que en la península de Yucatán, los mayas construyeron sus ciudades alrededor de los cenotes (unas oquedades naturales a veces al ras del suelo, y otras veces tan profundas que tenían que utilizarse escaleras para el acarreo del agua). Estos sistemas naturales fueron de gran ayuda para conservar los recursos hídricos; en este caso el agua. Figura 1.35.



Figura 1.35 Los cenotes de los mayas.

Además de los cenotes, también existieron otros tipos de obras hidráulicas, construidas ó adaptadas por los mayas bajo una concepción ambiental ó sanitaria. Se trata de los acales, mejor conocidos como **“aguadas”**, depresiones formadas por hundimiento local en la zona de calizas, las cuales fueron aprovechadas como enormes cisternas que guardaban el agua de las lluvias, y que fueron utilizadas con dos propósitos, uno de irrigación periférica, y otro de abastecimiento en periodos de escasez ó de sequía. Pocas veces se utilizaron sin adaptación, pues se corría el riesgo de filtraciones.

1.6.3 LA CULTURA INCA

Los incas fueron un pueblo de origen humilde, y llegaron a la ciudad de Cuzco hacia el año 1200 d. C., así mismo establecieron una gran dinastía cuyo primer Rey; *Manco Cápac*, había sido señalado por las leyendas como el fundador de esta cultura. Al igual que muchas otras civilizaciones, la historia de los Inca se basa en una historia de la creación. Cuenta la leyenda que el rey Manco Cápac y su esposa Mama Ocllo, bajaron desde el lago Titicaca hasta otras tierras (provistos, por consejos de su padre, el Sol) con una gran barra de oro que habría de servirles para reconocer el lugar donde tendrían que establecer su reino, y hacer prosperar la civilización del imperio. El Imperio Inca, mejor conocido con el nombre de Imperio de las cuatro regiones, abarcaba toda el área cultural andina, desde el sur de Colombia, hasta el centro de Chile y Ecuador. Los incas fueron grandes gobernantes que recopilaron y dieron gran extensión, a una serie de costumbres que ancestralmente existían en los andes. En el cenit de su poderío, esta cultura desarrollo un sistema político - administrativo, que jamás fue igualado y superado, por ningún otro pueblo nativo de América, pero en cuanto a conocimientos de astronomía y de escritura, estaban muy por debajo de los mayas y los aztecas. Cabe mencionar que algunas de las primeras culturas que se desarrollaron en el territorio del antiguo Perú, desaparecieron o fueron sometidas, por el Imperio incaico que emergió alrededor del año 1000 d. C., y que se caracterizó por su alto grado de desarrollo en los distintos campos de la ingeniería. Muestra de ello son las ruinas de edificios, puentes y acueductos. Los conocimientos de ingeniería hidráulica con que contaron, hicieron posible que la hoy árida costa peruana, fuese cultivada extensamente, poseyendo incluso una tecnología que permitía convertir la neblina en agua para la irrigación.

Desde aproximadamente alrededor del año 1450 y 1530 d. C., la costa occidental de América del sur, prosperó bajo el mandato del Imperio inca. A su altura, se podía comparar a los Inca, con los antiguos ingenieros de la antigua sociedad romana. Los éxitos de los Inca (sus carreteras, su gobierno y su sistema de cuentas), les ayudaron a dominar una extensa zona de América del sur. De igual forma, también construyeron caminos entre el reino de Ecuador, hasta la frontera sur de Argentina y Chile, lo que permitió un extenso sistema de comunicación. A lo largo de cada camino había mensajeros o "Chasquis", los cuales se encargaban de llevar los mensajes de un lado a otro con una gran eficiencia. La red de caminos contribuyó al gran éxito de los Inca, puesto que simplificó los esfuerzos del gobierno por controlar el imperio. Aunque el gobierno era muy organizado y eficiente, los incas no tenían estrictamente un

sistema de escritura, pues contaban con un complejo sistema de cuentas y archivos denominados "Quipus", un sistema de hilos anudados que hasta ahora espera ser descifrado. Su idioma fue el "quechua", considerado hoy, junto con el español, el idioma oficial del Perú. Los quipus consistían en una compleja combinación de cordones de diferentes colores y tamaños, los cuales formaban distintas clases de nudos. Estos nudos indicaban las unidades de: diez, cien, mil y diez mil unidades. Los cordones sueltos se sujetaban de un cordón más grueso (faja), para grabar datos como la cosecha y la capacidad de almacenamiento; además, eran muy complicados y utilizados por los quipucamayocs o contadores. Para ver la diferencia entre los nudos y su significado, los quipucamayocs, utilizaban diferentes medidas y colores. Por ejemplo, si un cordón era amarillo significaba: oro, uno blanco significaba: plata, y uno rojo significaba: soldados.

En cuanto a agricultura, cabe mencionar que los incas fueron un pueblo de agricultores avanzados: para cada zona desarrollaron una estrategia que permitía obtener el máximo provecho de las cosechas obtenidas del campo. Utilizaban andenes o terrazas de cultivo para aprovechar las laderas de los cerros, camellones o waru waru en zonas altas inundables (una forma de agricultura intensiva e integral). Algunos de los cultivos más importantes de esta cultura, fueron: la papa, el maíz, el ají, la chirimoya, la papaya, el tomate, el frijol y la coca. Los incas desarrollaron una de las mejores obras de ingeniería hidráulica, puesto que para los riegos, formaron embalases y construyeron presas y canales, así como andenes para salvar las diferencias de nivel y aprovechar las pocas tierras fértiles, que no eran sino terrazas detenidas por muros. Muestra de ello son algunas de terrazas o zonas de cultivo (andenes circulares), utilizados por ellos para el desarrollo de su agricultura.



Figura 1.36 Andenes o terrazas agrícolas.

En la figura 1.36, se ilustra una de las terrazas agrícolas (andenes), que utilizaron los incas, y que representaron un reto para ellos. Para conquistar estas condiciones difíciles, los Inca hicieron terrazas a lo largo de las montañas, y para regar sus cosechas, cambiaron la ruta de los ríos para prever canales así como terrazas. Esta innovación fue tan exitosa que muchas de aquellas terrazas todavía existen y están en uso hoy en día. Los Inca además de las impresionantes técnicas de riego, también eran expertos esculpiendo piedra, prueba de ellos son las grandes ciudades que hoy en día se aprecian.



Figura 1.37 Machu - Picchu la ciudad pérdida de los Inca.

En la figura 1.37, se ilustra una fotografía de Machu – Picchu, la ciudad perdida de los incas, es considerada por su magnificencia como la octava maravilla del mundo, y reconocida como patrimonio cultural de la humanidad. Esta antigua ciudad está localizada en la cima de una montaña de 8000 pies de altura (2440 metros de altura sobre el nivel del mar), y está prácticamente igual en la forma en que estaba cuando la habitaron los Inca. Tal vez por razones de altura y de localización, los conquistadores españoles nunca encontraron esta ciudad.

De acuerdo con algunas investigaciones recientes, la cultura preincaica, en el alto Bolivia, desarrolló una impresionante ingeniería hidráulica y civil, puesto que derivaba las aguas del lago Titicaca, influencia decisiva del pueblo maya quiché. Pocos son los sistemas de reserva y de irrigación propios de una cultura; pues corresponden más a regiones, aunque sin llegar a precisar que no se encuentren en otra parte, tal es el caso de los famosos “almacenes de agua”, mejor conocidos como amanalli, pozo o jaguey. También existentes en la costa norte del área andina.



Figura 1.38 El Lago Titicaca

En la figura 1.38, se ilustra el Lago Titicaca ubicado entre Perú y Bolivia. Su extensión es de 8300 kilómetros cuadrados y se encuentra a una altitud de 3850 metros sobre el nivel del mar, lo que lo convierte en uno de los más elevados del mundo, con la particularidad de que jamás se congelan sus aguas. También cuenta con algunas islas famosas por contener importantes ruinas arqueológicas de origen incaico (islas de Titicaca y Coatí). Tipón, un Parque Arqueológico Nacional, localizado hacia el este de la ciudad de Cuzco: tiene como principal característica la increíble ingeniería hidráulica que llegó a alcanzar la Cultura Inca representada por sus extraordinarios acueductos y canales de irrigación. Figura 1.39.



Figura 1.39 Canales de irrigación de la cultura Inca, ubicados en Tipón.

Algunas otras obras de admiración de esta cultura son las fuentes de la ciudad de Tampumachay cerca de Cuzco. Como en otros lugares, también allí existen ruinas imponentes de embalses y terrazas, construidas a diferentes niveles y unidas mediante canales de piedra.



Figura 1.40 Fuente de Tampumachay cerca de Cuzco.

En cuanto a las creencias de los incas, la religión tuvo un carácter de gran formalidad. El dios supremo de los incas era Viracocha, creador y señor de todas las cosas vivientes: existieron varios dioses incas, pero en particular la diosa más asociada a la agricultura, riego y distribución del agua, según las creencias de los incas era la diosa Llapa (diosa del rayo y de la lluvia). Cabe mencionar que los llamados “baños del inca” tenían funciones religiosas, agrícolas y ceremoniales.



Figura 1.41 Baños de la cultura inca.

En la figura 1.41, se ilustran los Baños del Inca, un conjunto bien ordenado de estructuras, baños, canales y estanques de agua sulfurosa, que proviene de manantiales volcánicos que ahí afloran. Tomando como base algunas descripciones históricas, todo indica que estos baños funcionaban como lugar de descanso o de relajación (rituales). Hoy en día, todavía se pueden apreciar algunos de los sistemas de funcionamiento de estos baños, como son; los canales y las tuberías de piedra que hacen posible que el agua caliente circule, y se mezcle con el agua fría, antes de llegar a los estanques del baño, actualmente de uso público.

Las ceremonias y rituales incas eran numerosos y frecuentemente complejos, ya que estaban relacionados con las cuestiones agrícolas y de la salud, en particular con el cultivo y la recolección de la cosecha, así como la curación de diversas enfermedades. Finalmente ya para concluir, un rubro complementario en el aspecto sanitario, en casi todas las culturas, fueron los canales para evacuación del agua residual. Los drenajes eran subterráneos, y atravesaban todo el conjunto, y desembocan en atarjeas abiertas.

1.7 LA EDAD MEDIA Y LAS APORTACIONES DE LOS ÁRABES EN EL DESARROLLO DE LA MECÁNICA DE LOS FLUIDOS.

Muchos de los escritos de Arquímedes, así como algunas de sus ideas fueron fielmente transmitidas al Oeste por científicos del mundo árabe. Durante este periodo de tiempo, mejor conocido como la Edad Media (época del oscurantismo), se acuñó por primera vez la palabra: *ingeniero*. El principal cambio que se dio durante la Edad Media, no fueron sus catedrales, ni su épica, sino el desarrollo de una civilización "moderna", que no se basó en el trabajo de los esclavos (peones), sino primordialmente en el trabajo de las máquinas. Un factor clave que se cree que estimuló indirectamente el desarrollo y avance de la ciencia, durante este periodo de tiempo, fue el decaimiento de la esclavitud y el continuo avance del cristianismo. Durante esta época, las principales fuerzas de potencia fueron la fuerza hidráulica, tales como el viento y el caballo, las cuales se centraron en el desarrollo de las turbinas hidráulicas y los molinos de viento.

De igual forma, los ingenieros medievales incrementaron el nivel de las técnicas de construcción, ya que diseñaron construcciones y máquinas hidráulicas, que jamás fueron igualadas y superadas por ninguna otra cultura de la antigüedad. Entre algunos de los descubrimientos e invenciones que se desarrollaron durante la Edad Media, sobresalen: **el reloj mecánico y la clepsidra**. Esta última es perfeccionada y utilizada durante esta época. En la siguiente figura, se ilustra la clepsidra, uno de los instrumentos o artefactos que eran muy utilizados durante la Edad Media, y que servía como referencia para indicar el tiempo (reloj de agua).



Figura 1.42 La Clepsidra

Esta idea tan sencilla, como tantas otras, fue desarrollada hasta alcanzar un alto grado de complejidad técnica y artística. Dicho artefacto estaba conformado por un pequeño recipiente con un orificio en el fondo, a través del cual el agua goteaba a velocidad constante. El nivel en el recipiente, al ir bajando, marcaba el tiempo en una escala fija en las paredes.

El intercambio de ideas con los árabes, como anteriormente mencionamos, a través de las diversas guerras de conquista y reconquista mutua, incluyendo las cruzadas, permitieron un flujo de ideas, invenciones y costumbres que en el crisol del tiempo dieron luz a la deslumbrante explosión renacentista. Cabe mencionar que durante su dominación en España, los árabes, construyeron excelentes sistemas de riego, notabilísimos no solamente por la perfección de sus redes de canales y acequias, sino también por la sabiduría de sus normas que regían su utilización. El riego de los cultivos era relativamente fácil, si el nivel del agua disponible, era más alto que el de las tierras que se regaban; esa agua era conducida mediante cauces artificiales hasta los campos, tal es de los canales o acequias. Los árabes, no solamente sobresalieron por sus brillantes sistemas de riego, sino también construyeron excelentes jardines, aljibes (pozos de agua), baños públicos y albercas. De igual forma, también conocieron y utilizaron el molino de viento (siglo X), y de agua (siglo XIII), así mismo construyeron nuevos acueductos y restauraron los viejos romanos (mejorando pendientes y canales). En la siguiente figura, se ilustra un conducto de agua que era muy utilizado por los árabes, y que servía para el riego de los cultivos. El agua que fluye a través del canal principal se desvía de este conducto principal en dirección hacia las acequias laterales, por medio de compuertas como las que se aprecian en la figura 1.43.

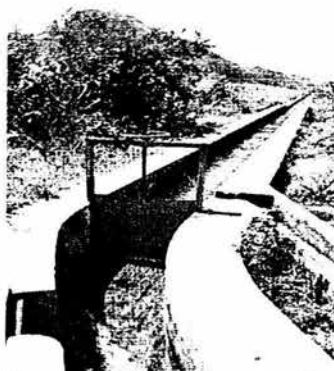


Figura 1.43 Acequia o canal

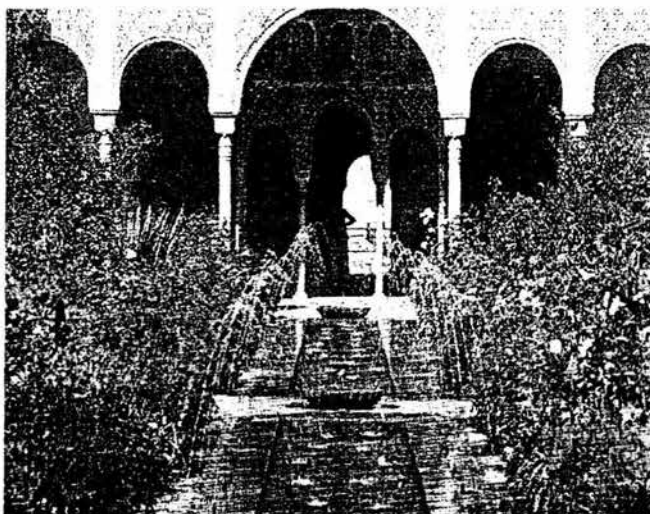


Figura 1.44 Bellos jardines que incluyen un patio de acequias y varias fuentes de agua construidas por los árabes, en el siglo XIV (Bagdad).

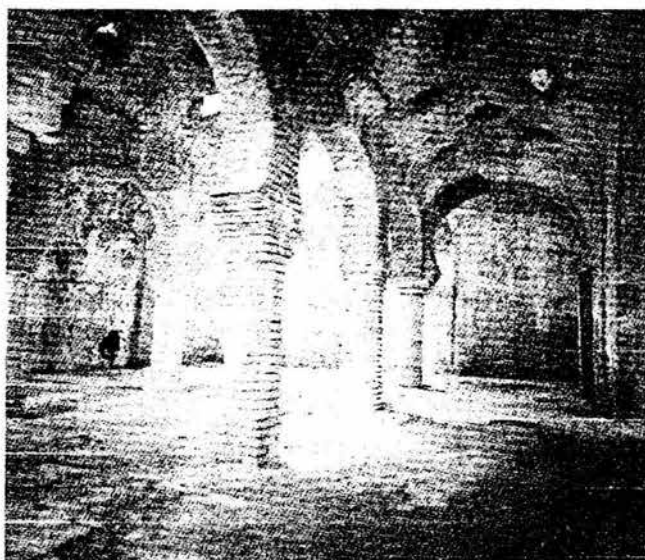


Figura 1.45 Baños de la cultura árabe (siglo XIV).

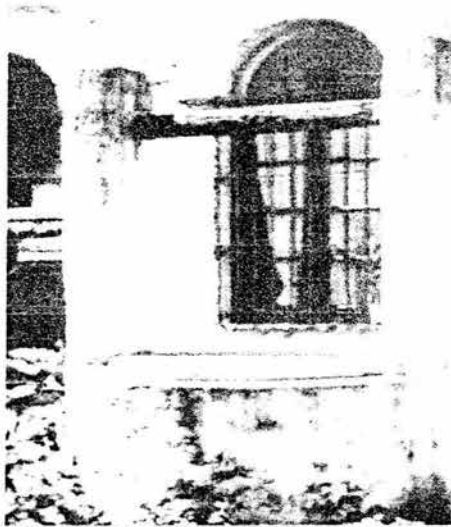


Figura 1.46 Aljibe, pozo o cisterna.

En la figura 1.46, se ilustra un pozo o aljibe, el cual era muy utilizado por los árabes para almacenar el agua.

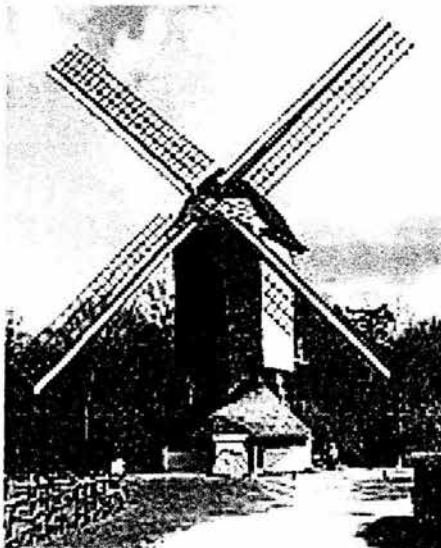


Figura 1.47 Molino de Viento

En la figura 1.47, se ilustra un molino de viento o eólico que data del siglo X d. C., el cual estaba conformado por una torre de madera y varias aspas acopladas por el interior a un eje vertical que atravesaban el centro de la torre. Algunas de las funciones principales que desarrollaron los molinos de viento, durante la Edad Media, fueron las siguientes: **la molienda del trigo y el bombeo del agua**. Cabe mencionar que hoy en día los molinos de viento se siguen utilizando, y todavía se siguen perfeccionando. Los árabes fueron verdaderos maestros en el manejo del agua, ya que también utilizaron las ruedas hidráulicas, así como una gran infinidad de sus aplicaciones, pero fue realmente durante la Edad Media, cuando este ingenioso mecanismo se extendió por todas las regiones a la mayor parte de los oficios conocidos, tales como: el forjador de metales, la molienda y los tejedores. En esta época las ruedas hidráulicas de madera desarrollaban una potencia de cincuenta caballos de fuerza; además, liberaron al hombre de los trabajos más difíciles (trabajo bruto), e influyeron en una reducción de la mano de obra. En la siguiente figura, se ilustra una rueda hidráulica árabe, mandada a construir en Córdoba por el califa árabe **ʿAbdal – Rahmān (III)**.

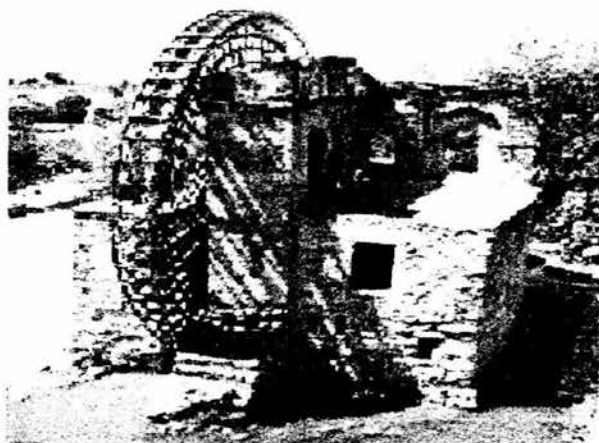


Figura 1.48 Rueda hidráulica árabe mandada a construir en Córdoba por el califa árabe; ʿAbdal – Rahmān (III).

ʿAbdal – Rahmān III (891 – 961 d. C), distinguido político y gobernante de origen árabe, es considerado como el fundador del califato de Córdoba en España musulmana, durante el periodo comprendido entre 912 y 961 d. C. Nació en el año 891 d. C., en Córdoba, una de las provincias de España en Andalucía.



Figura 1.49 'Abdal - Rahmān III
(891 - 961 d. C.)

Al acceder al trono del califato, se propuso llevar a cabo dos objetivos prioritarios, los cuales consistían en terminar con la anarquía imperante, y reducir los focos independentistas de Bobastro (el muladí 'Umar ibn Hafsūn) y de Toledo (otra provincia de España, localizada hacia el noroeste de Castilla - La Mancha). Para lograr esos objetivos, se encargó de involucrar a la aristocracia árabe en sus proyectos políticos, y organizó una larga guerra contra 'Umar y sus sucesores, durante el período comprendido entre 916 y 928 d. C., así mismo entró en combate con el asedio de Toledo (932 d. C.). Su gobierno contempló el predominio del Imperio musulmán sobre los reyes cristianos, y sobre los fatimíes del norte de África; predominio que duró hasta la ofensiva de estos últimos entre 958 y 959 d. C. Años más tarde, finalizó sus relaciones políticas con Bagdad, y se proclamó califa independiente en 929 d. C.

Poco tiempo después, centralizó el estado y saneó la hacienda, gracias al desarrollo de la agricultura, industria y comercio. También sugirió algunos diseños para construir maquinas hidráulicas, entre estas: ruedas hidráulicas y molinos de viento. Cabe mencionar que en el interior de los recintos sagrados mandados a construir por 'Abdal - Rahmān III (891 - 961 d. C.), en las regiones desérticas (estepas), se han encontrado vestigios importantes de instalaciones hidráulicas, entre estas: tuberías para el drenaje y tuberías para el suministro del agua.

Es muy importante mencionar que *ʿAbdal – Rahmān III* (891 – 961 d. C), convirtió a Córdoba en una de las ciudades más importantes del occidente europeo, tanto por sus construcciones (la mezquita, el alcázar y la ciudad del palacio de Madīnat al - Zahrā'), como por su esplendor cultural (la primera escuela de medicina de Europa). Murió en el año 961 d. C., en la ciudad de Córdoba, a sus setenta años de edad.

En Asia el desarrollo de la ingeniería también avanzó con complejas técnicas de construcción, tal es el caso de la ingeniería hidráulica y metalurgia, las cuales ayudaron a crear civilizaciones como la del imperio Mongol, cuyas grandes y bellas ciudades impresionaron a Marco Polo en el siglo XIII.

Los diez siglos que siguen a la caída del Imperio romano, y que gestan la aparición de una brillante era en la historia de nuestra civilización, sirvieron para consolidar el sistema económico feudal y el poder de la iglesia cristiana, asimilándose el legado filosófico griego. Este último aspecto llegó a su climax con la aristotelización del cristianismo iniciado por *Santo Tomás de Aquino* (1225 – 1274), en el siglo XI. Hacia finales de la Edad Media, algunos de los principios aristotélicos sobre la no existencia del vacío, y la velocidad de caída de los cuerpos como función de su masa, se empezaron a cuestionar en las universidades (particularmente de París, Oxford y Cambridge), y a establecerse relaciones mecánicas simples entre la velocidad y la aceleración. De igual forma, la incorporación de las matemáticas, la lógica, la metafísica y la astronomía griegas en la enseñanza de las “universidades” medievales, que fundara Carlomagno en el siglo VIII, llevó a la formulación de la educación escolástica basada en las siete artes liberales agrupadas de la siguiente forma: el trivium (gramática, lógica y retórica), y el quadrivium o artes matemáticas (aritmética, astronomía, geometría y música). En el periodo que concluye con el siglo XIV, destacaron los procesos de crítica a la metafísica y mecánica aristotélicas, representadas por *Juan Buridan en Francia* (1300 – 1358), y *Guillermo de Occam* (1285 – 1349), en Inglaterra.

Esta etapa de revisión crítica fue el fruto de un proceso lento, laborioso y acumulativo de múltiples, protagonistas, tiempos y lugares. “*Una consecuencia directa de esto, es el nacimiento de las ciencias experimentales*”. En un siglo de notable esplendor sobresale un hombre que destacó en todas y cada una de las diversas actividades en las que estuvo interesado. Su universalidad sólo es igualada por su profundidad y calidad. *Leonardo da Vinci* (1452 – 1519), en cuanto a la ciencia y a los fluidos se refiere, marca el siguiente paso después de Arquímedes.

CAPÍTULO 2

DEL SIGLO XIV AL SIGLO XVIII

CAPITULO 2. DEL SIGLO XIV AL SIGLO XVIII

2.1 LEONARDO DA VINCI Y EL PRINCIPIO DE LA CONTINUIDAD.

Durante el renacimiento se presentaron nuevas contribuciones, una de ellas fue la del gran artista e inventor del renacimiento; **Leonardo da Vinci (1452 – 1519)**. En el área de los fluidos se le acredita la primera formulación del principio básico de la hidráulica, mejor conocido como “*el principio de la continuidad*”. Dicho principio lo dedujo a partir de sus observaciones, como resultado de enfatizar el estudio de la naturaleza, así mismo observó y dibujo muchos otros fenómenos relacionados con el comportamiento de los fluidos, y *sugirió algunos diseños para construir maquinaria hidráulica.*



Figura 2.1 Leonardo da Vinci
(1452 – 1519)

Leonardo da Vinci distinguido científico, pintor, escultor, dibujante, arquitecto e ingeniero de origen italiano, es considerado como uno de los máximos genios de la historia. Nació el día 15 de abril de 1452 en Toscana, cerca de la ciudad de Florencia en Italia. Al parecer su padre, fue un celebre notario llamado; *Piero di Antonio* (1425 – 1498), y su madre en cambio, una humilde campesina al servicio de la familia. En los primeros años de su vida se educó en compañía de su abuelo el señor; *Antonio da Vinci* (1401 – 1479), y de

su padre. Poco tiempo después uno de sus tíos llamado; Francesco da Vinci (1410 – 1473), se convirtió en su primer maestro, el cual lo indujo hacia el estudio de la naturaleza, así como a los primeros ejercicios del dibujo. Mas tarde ingresó a la ciudad de Florencia, donde tuvo por maestro a uno de los artistas más famosos de la época; Andrea del Verrocchio (1435 – 1488). En dicha etapa de su vida, Leonardo da Vinci, adquirió el conocimiento y la formación como **pintor, escultor y dibujante**. Años más tarde, Leonardo fue el primero que hizo énfasis en el estudio de la naturaleza, lo que lo llevó a planear la construcción de un canal en el río Arno de manera que fuera navegable entre Pisa y Florencia. Muchas de las observaciones hidráulicas que efectuó Leonardo quedaron grabadas en numerosos dibujos que incluyen; **ondas, olas, chorros, remolinos y el vuelo de las aves**. En particular una de sus mejores aportaciones con la que contribuyó Leonardo, al desarrollo de la mecánica de los fluidos fue la primera formulación del principio básico de la hidráulica, mejor conocido como “el principio de la continuidad”, cuyo enunciado es el siguiente:

“La velocidad de un fluido varía inversamente con el área de la sección transversal de la corriente”.

Dicho principio lo dedujo a partir del movimiento de las aguas en ductos, canales y ríos, lo que lo llevó a formular de forma cuantitativa este principio. El principio de la continuidad en las palabras de Leonardo dice; ***En cada parte de un río, y en tiempos iguales, pasa la misma cantidad de agua, independientemente de su ancho, profundidad, tortuosidad y pendiente”.*** Y por lo tanto cada masa de agua, con igual área superficial correrá tanto más rápido como poco profunda sea.

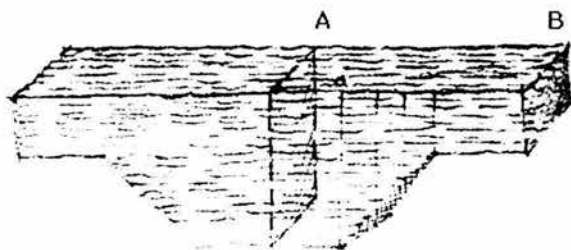
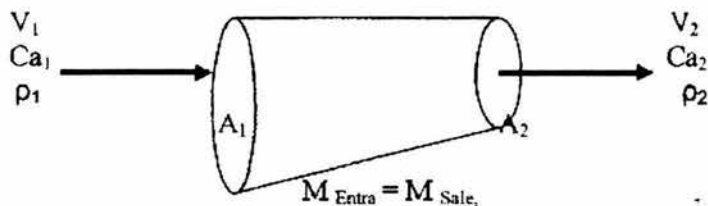


Figura 2.2 Secciones de Leonardo da Vinci

En la figura 2.2, se ilustran dos secciones de la corriente de un fluido, y la sección que corresponde como **A**, es donde el agua fluye menos rápido que en **B**, tanto más como la profundidad de **A** cabe en **B**.

Ecuación de Continuidad (Conservación de la masa). Si se aplica un balance de materia a un ducto por el cual pasa un fluido en régimen permanente, se establece que la cantidad de materia que entra, es la misma que sale, es decir:



Dicho principio de la conservación de la materia, puede expresarse de la siguiente forma:

$$M_1 = M_2$$

$$u_1 \cdot A_1 \cdot \rho_1 = u_2 \cdot A_2 \cdot \rho_2$$

$$Ca_1 \cdot \rho_1 = Ca_2 \cdot \rho_2$$

Donde: Ca ; es el caudal o gasto volumétrico que atraviesa el fluido en la sección transversal o área de flujo por donde fluye, y se define de la siguiente forma:

$$C_a = u \cdot A$$

Si se trata del mismo fluido líquido incompresible, el valor que se tiene para la densidad, permanecerá constante, $\rho_1 = \rho_2$, y por lo tanto el balance de materia o ecuación de la continuidad, quedará expresado de la siguiente forma:

$$u_1 \cdot A_1 = u_2 \cdot A_2$$

$$u_2 = u_1 \frac{A_1}{A_2} = u_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2$$

Este principio es considerado como una de las primeras formulaciones de forma clara y cuantitativa de la ecuación de continuidad, como anteriormente mencionamos, para el flujo estacionario (que no cambia con el tiempo), y de característica incompresible (densidad constante), y cuyo resultado en términos más apropiados, que no más comunes, establece que **la velocidad es inversamente proporcional a la sección transversal**. Equivalentemente, el producto de la velocidad y el área, en cada sección, es constante. La generalización de este resultado en la forma que hoy se conoce tomó todavía 300 años más.

Otras aportaciones con las que contribuyó Leonardo, al desarrollo de esta ciencia fueron: algunos diseños para máquinas y molinos movidos por la fuerza del agua.

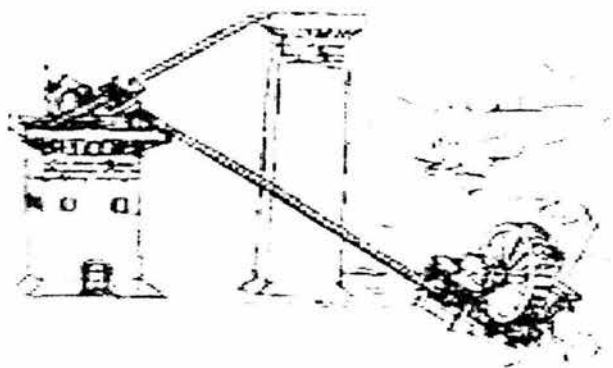


Figura 2.3 Rueda hidráulica propuesta por Leonardo da Vinci en el año de 1501.

En la figura 2.3, se ilustra un molino de agua (rueda hidráulica), propuesta por Leonardo da Vinci en 1501 (véase balance de energía mecánica o biografía de Daniel Bernoulli). La máquina está integrada por dos tornillos de Arquímedes y dos torres, la cual se activa por el movimiento giratorio de la rueda y los tornillos, impulsando el agua hasta la torre más alta. Esta torre funcionaba como depósito ó contenedor del agua, para alimentar algunas tomas de agua, bajo el efecto de la gravedad. Es muy importante mencionar que muchas de las observaciones de Leonardo, desafortunadamente las anotaba con escritura de espejo (probablemente para guardar el secreto). Además muchas de estas notas estuvieron perdidas siglos después de su muerte, siendo así como sus descubrimientos, a pesar de su importancia tuvieron poco efecto en el desarrollo de la ciencia.

Otros estudios de Leonardo versaron sobre: el vuelo, la generación y la propagación de ondas, el movimiento de los remolinos (vórtices), y el papel de éstos en los flujos irregulares que llamamos turbulentos. Es muy importante mencionar que estos estudios de carácter cualitativo ó puramente descriptivo influyeron en forma directa e indirecta en el desarrollo de; **la hidráulica y la hidrodinámica.**



Figura 2.4 El helicóptero una de las intuiciones más famosas de Leonardo sobre el vuelo.

En la figura 2.4, se ilustra uno de los proyectos más fantásticos de Leonardo, sobre el vuelo; la máquina voladora (el helicóptero), y es el que mejor ilustra el carácter metódico del pensamiento de Leonardo, quién parte de la observación de los pájaros; estudia la anatomía del ala y la disposición de la plumas; observa el vuelo y comprueba que el movimiento es distinto durante la sustentación, el avance y el aterrizaje. Figura 2.5.



Figura 2.5 El vuelo de los pájaros

2.1.1 LA HIDRÁULICA Y LAS CREACIONES DE LEONARDO DA VINCI

En tiempos de Leonardo da Vinci las vías fluviales eran mucho más importantes que hoy, ya que los transportes en barca eran más rápidos y baratos que los que se hacían con carros, a causa del pésimo estado de los caminos y de los medios de transporte que de entonces se disponía. Los canales también favorecían el riego, y el desarrollo de la agricultura; utilizando los desniveles de los canales, se podía aprovechar el agua para la producción de energía y accionar molinos. Florencia, ciudad del interior de Italia, sentía la necesidad de una eficaz conexión con el mar, y desde hacía más de un siglo, los florentinos acariciaban la idea de llegar al mar Tirreno a través de un gran canal acuático. Fue así como Leonardo después de su regreso a Florencia, tiene la idea de llevar a la práctica ese sueño, estudiando la construcción de un canal navegable desde Florencia hasta el río Arno cerca de la ciudad de Pisa, antigua república marinera enemiga de Florencia. Leonardo inicia este proyecto y echa mano de toda la experiencia que ha acumulado en el campo de la ingeniería hidráulica, pues en la ciudad de Milán, realizó numerosos proyectos para la mejora de la red de canales de Lombardía. En la siguiente figura, se ilustra una parte del proyecto de Leonardo, sobre; el diseño y la construcción del canal navegable que partía desde Florencia hasta el río Arno.

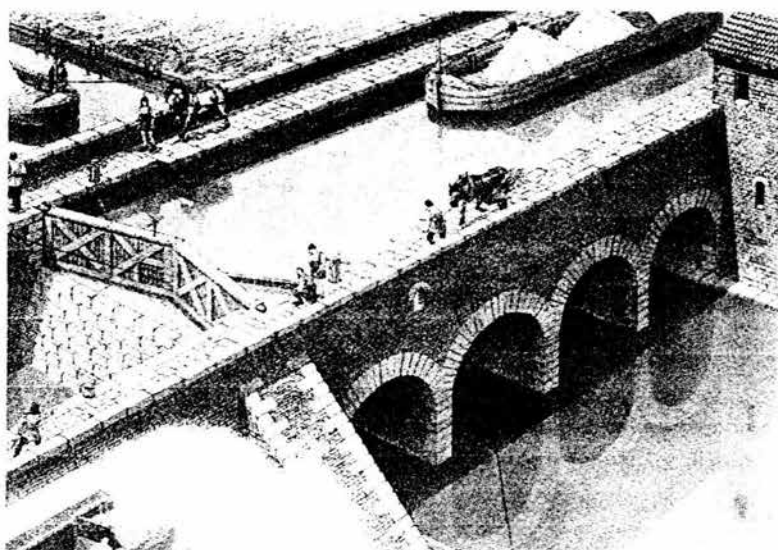


Figura 2.6 Uno de los mejores proyectos de Leonardo; la construcción del gran canal navegable desde Pisa hasta Florencia.

Un aspecto muy importante que conviene mencionar, con respecto al canal navegable, mostrado en la figura anterior. Es que para su construcción, Leonardo consideró que el trabajo de los hombres hubiera llevado muchísimos años, si sólo se hubieran utilizado máquinas simples, tales como: picos y palas. Tal es el caso del desvío del Arno, y para esto, Leonardo proyectó grandes máquinas excavadoras capaces de avanzar con gran rapidez. El Arno se secaba en verano, y luego en invierno, la navegación era muy difícil, debido a su curso irregular y tortuoso. Como el régimen torrencial de éste río era difícilmente navegable, Leonardo proyectó un canal alimentado por otros ríos que bajaban desde las montañas de los Apeninos. Partiendo desde Florencia, el canal habría vuelto al Arno cerca de Pisa. Ese canal debía de atravesar un túnel de un kilómetro de longitud, debajo de la colina de Serravalle.

Leonardo es considerado el inventor de muchos ingenios hidráulicos, pero en particular, se le atribuye la invención de las **esclusas**, que en aquel tiempo permitían controlar el nivel del agua en los canales para que las embarcaciones pudieran salvar notables desniveles.

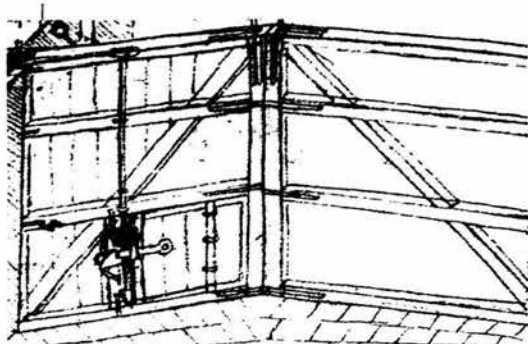


Figura 2.7 Esclusas que controlaban el nivel del agua en los canales.

Finalmente el gran artista e inventor del renacimiento Leonardo da Vinci. Murió el día 2 de mayo de 1519, en la ciudad de Cloux (Francia), a sus 67 años de edad.

2.2 EL PRINCIPIO FUNDAMENTAL DE LA HIDROSTÁTICA

El siguiente paso después de Leonardo da Vinci, lo dio el matemático e ingeniero hidráulico; **Simón Stevin (1548 – 1620)**. Considerado como el fundador de la ciencia de la hidrostática, al demostrar que; la fuerza ejercida por un líquido sobre la base de un recipiente, es igual al peso de la columna de líquido que se extiende desde la base hasta la superficie libre. Dicha fuerza no depende de la forma del recipiente, y ha llegado a ser mejor conocida como la paradoja hidrostática.



Figura 2.8 Simón Stevin
(1548 – 1620)

Simón Stevin distinguido ingeniero hidráulico, físico, matemático, e inventor de origen holandés, nació el día 28 de abril de 1548 en la ciudad de las Brujas, Flanders (ahora Bélgica). En los primeros años de su vida trabajó como auxiliar contable en Amberes, luego como oficinista en la casa de impuestos de Brujas, después se cambió a la ciudad de Leiden, en donde asistió a la escuela primaria y más tarde ingresó a la universidad en el año de 1583. Al formar parte del ejército holandés, inventó una forma de inundar las partes bajas del país abriendo diques seleccionados y causando grandes prejuicios a la armada española invasora. Fue un gran ingeniero que construyó **molinos de viento, puertos y esclusas**. También sobresalió por sus estudios e investigaciones en el desarrollo de diversas áreas de las matemáticas y de la física. Una de sus

contribuciones al desarrollo de la mecánica de los fluidos fue la primera formulación y demostración del principio fundamental de la hidrostática, que dice:

“La presión ejercida por un líquido sobre una superficie depende de la altura del líquido y del área de la superficie”.

Dicho principio fue formulado y demostrado por Simón Stevin, en el año de **1586**. La siguiente expresión, es la ecuación fundamental de la hidrostática, y la que mejor representa los efectos de la presión en los fluidos:

$$\Delta P = \gamma \cdot h$$

Donde: ΔP ; es la caída de presión por unidad de longitud, γ ; es el peso específico del líquido y h ; es la altura de la columna de líquido. En la siguiente figura, se puede apreciar un equipo de tipo experimental con el que se puede determinar el principio fundamental de la hidrostática.

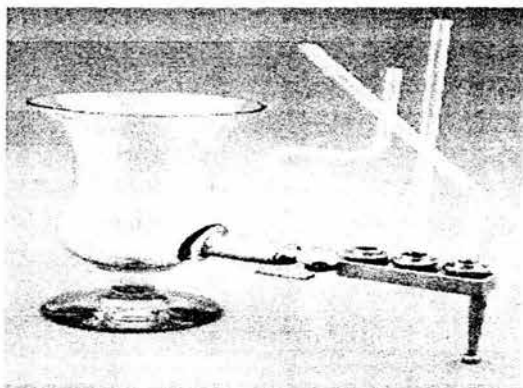


Figura 2.9 Equipo experimental para determinar el principio fundamental de la hidrostática.

Como autor de 11 libros, Simón Stevin, hizo importantes aportaciones en el desarrollo de la trigonometría, geografía, fortificaciones y navegación. Al sentirse inspirado por Arquímedes (287 – 212 a. C), Stevin escribió varios libros sobre mecánica. Aunque no fue el inventor de la notación decimal (habían sido inventadas por los chinos y los árabes hacía mucho tiempo), introdujo su uso en las matemáticas. Su notación fue seguida por Clavius (1538 - 1612), y Napier

(1550 - 1617). Stevin indicó que el uso universal de los decimales en las monedas, medidas y pesos era sólo cuestión del tiempo. La noción de Stevin sobre los números reales fue aceptada por los demás científicos, así como el concepto de número negativo. En su libro titulado; **Stelregchel**, (conceptos de álgebra), utilizó las notaciones +, - y $\sqrt{\quad}$. En 1586, tres años antes de Galileo, Stevin informó que pesos diferentes caen desde una altura dada al mismo tiempo. Murió el día 20 de abril de 1620, en la ciudad de la Haya (Holanda), a sus 72 años de edad.

2.3 LA MÁQUINA HIDRÁULICA QUE DESARROLLO GALILEO GALILEI COMO APORTACIÓN A LA MECÁNICA DE LOS FLUIDOS.

Un aspecto decisivo en el paso de la especulación aristotélica a la ciencia posgalileana, fue la introducción de la observación como pilar y sustento de la razón. Para entender el mundo, la razón pura demostró su fracaso. Así pues del muy joven Leonardo al anciano Galileo, se ve un cambio único en la historia. En estos doscientos años se lleva a cabo el florecimiento resultante de los previos dos mil años de siembras y cuidados.

La observación y experimentación surgen como elementos indispensables del conocimiento científico, y de igual forma se hace uso de un lenguaje adecuado, así como la generalización deductiva ó inductiva que complementan a estas dos y que dan sentido. Si Leonardo fue el primer científico observador, Galileo adicionó la experimentación a la observación.

De esta forma es como aparece en la historia de esta ciencia, el gran científico; **Galileo Galilei (1564 – 1642)**, a quién, le toca completar el esqueleto del método científico, pues transforma a la mecánica en una ciencia partiendo de una crítica constructiva de la metafísica escolástica. Utilizando a la experimentación como guía, como lo hiciera Leonardo, introduce el lenguaje de las matemáticas para formalizar y extender sus resultados, generalizar sus concepciones y sentar las bases de una nueva manera de estudiar la naturaleza. Y con metodología semejante a la de Arquímedes, Galileo escribió **(a diferencia de Leonardo, no “al revés”)**, y fue leído, y desde luego, criticado por sus contemporáneos. La contribución de Galileo, a la mecánica de los fluidos fue profunda, aunque de algún modo indirecta, al participar en la fundamentación de la mecánica, de la física y de la ciencia misma. La astronomía fue la motivación de su trabajo y la pasión de su vida. Afirmaba comprender en aquel entonces, más de los cuerpos celestes que de los fluidos que observamos todos los días.



Figura 2.10 Galileo Galilei
(1564 – 1642).

Galileo Galilei distinguido físico, matemático y astrónomo de origen italiano, es considerado como el fundador de la mecánica experimental, así como el científico más importante de su época. Nació el día 15 de febrero de 1564 en la ciudad de Pisa (Italia). Su padre fue un distinguido músico y matemático de nombre; **Vincenzo Galilei (1520 – 1591)**, y su madre en cambio, una humilde mujer al cuidado de sus tres hijos. En los primeros años de su vida, se educó en compañía de sus padres, poco tiempo después llevó a cabo sus primeros estudios en un Monasterio cerca de la ciudad de Florencia. Mas tarde ingresó a la universidad de Pisa en el año de 1581, donde adquirió ciertos conocimientos sobre; medicina. Sin embargo, sus intereses por las matemáticas y la física hicieron que cediera su talento por estas ciencias, y en 1589, fue nombrado profesor de matemáticas en la universidad de Pisa. Puesto que desempeñó hasta el año de 1592. Durante su estancia en esta universidad, emprendió algunos de sus primeros experimentos sobre; la caída de los cuerpos y el movimiento de los proyectiles. De igual forma en el año de 1588, inventó la primera balanza hidrostática, y en 1589, publicó una serie de estudios los cuales concernían sobre; los efectos de la gravedad. En el año de 1590, publicó uno de sus mejores trabajos, el cual tituló; **“De Motu gravium”** (Tratado sobre el movimiento), en el cual describe algunos experimentos sobre la caída de los cuerpos. Posteriormente fue nombrado profesor de matemáticas en la universidad de Padúa, durante el periodo comprendido entre 1592 y 1610.

En esta etapa de su vida, Galileo llevó a cabo un gran número de estudios y experimentos sobre el desarrollo de diversas ciencias, entre estas: la mecánica, astronomía, termometría y magnetismo. Es muy importante mencionar que Galileo Galilei, fue considerado como uno de los prolíficos genios de aquella época, ya que destacó en numerosos campos de la ciencia, pero sobre todo en; ***mecánica y astronomía***. También es considerado como uno de los constructores de los primeros telescopios, y desde luego el primero que los utilizó para la observación de los astros. Al defender sus teorías ***Copérnico (1473 – 1543)***, entró en conflicto con la Iglesia.



Figura 2.11 Telescopio de Galileo 1610.

En la figura 2.11, se ilustra un telescopio utilizado por Galileo, con el cual efectuó numerosas observaciones de tipo celestial, la más espectacular fue *la del descubrimiento de los satélites de Júpiter*. Y con el resultado de este descubrimiento, contradujo la idea aristotélica, de que todos los astros debían girar alrededor de la Tierra, así mismo descubrió que las estrellas no poseían diámetro aparente. También descubrió que la superficie de la Luna es rugosa e irregular, y no lisa y perfectamente esférica como se creía (poseía montañas, relieves y valles). De igual forma, comprobó que el planeta Venus presentaba fases (como las de la Luna), observación que lo llevó a concluir que el planeta Venus gira alrededor del Sol, como aseguraba el astrónomo Copérnico en su teoría heliocéntrica. Con base a estos descubrimientos, Galileo procedió a defender y a divulgar la teoría de que la Tierra, así como los demás planetas, se mueven realmente alrededor del Sol.

Estas ideas fueron presentadas en su obra; "Diálogos sobre los dos Grandes Sistemas del Mundo", publicada en 1632, y en la cual Galileo defiende la teoría heliocéntrica. A Galileo Galilei también se le acredita la invención del termoscopio (un termómetro primitivo), siendo este el primer sistema para medir temperaturas, propuesto por este genio en el año de 1592. En particular la contribución de Galileo Galilei, al desarrollo de la mecánica de los fluidos fue *el invento y la patente que obtuvo en el año de 1594, de una máquina que utilizó para bombear el agua, mediante bombas y caballos, así como brújulas de tipo militar (utilizó el termoscopio para medir la temperatura y las variaciones del nivel del líquido en este dispositivo). La invención de este dispositivo hidráulico estimuló indirectamente la hidráulica experimental; pues revisó y analizó el concepto aristotélico del vacío.*

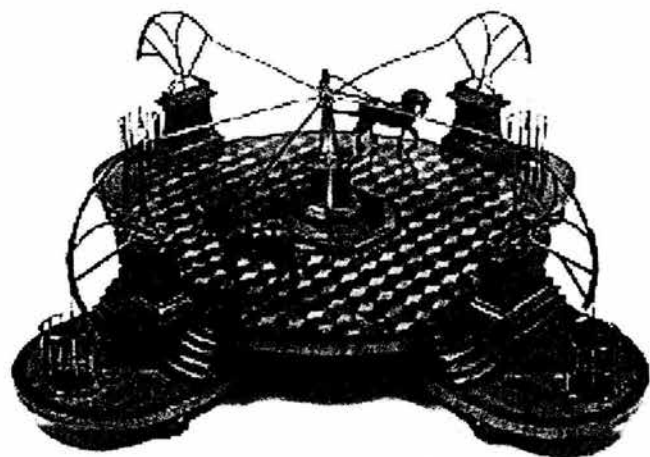


Figura 2.12 Máquina hidráulica que utilizó Galileo para bombear el agua, y patentada por este científico en 1594.

En la figura 2.12, se ilustra un sistema mecánico por medio del cual era posible activar algunas bombas hidráulicas, debido al movimiento exacto de una viga. El modelo ilustra, una elegante estructura en detalle, incluyendo pilares y escaleras. También representa una plataforma circular embudida que se asemeja a un piso, al lado del cual hay cuatro ejes, diametralmente localizados, y en el centro de la plataforma hay una columna que lleva una manija que es movida por un par de caballos atados a dos barras. El movimiento rotatorio de la manija es transformado en un movimiento alterno del balance de ruedas que, por medio de las cadenas, activa cuatro bombas (no representadas en el modelo), que succionaban el agua desde los pozos. Y con este dispositivo Galileo fue acreedor de la patente que obtuvo en el año de

1594, en compañía de la asociación; *The Provveditori del Comune of Padua*. Algunos otros detalles sobre el funcionamiento de esta máquina no son conocidos. Sin embargo, en las palabras de Galileo, dice al respecto:

“Un dispositivo practico para levantar el agua y la irrigación de la tierra, muy fácil de utilizar, barato y muy conveniente, que trabaja usando las bombas con apenas un caballo, rociando la tierra continuamente”.

Posteriormente surgió la necesidad de preguntarse, cual era la concepción que se tenía acerca del vacío; *horror vacui*. Dicha concepción aristotélica en torno al vacío, así como la aceptación sin reservas de esta idea dominaron hasta mediados del siglo XVII. Según Aristóteles la naturaleza tiende a llenar todos los espacios con cualquier medio a su alcance, siendo el vacío una imposibilidad de tipo físico. La frase *horror vacui* vino a resumir esta creencia a través del tiempo, y se llegaron a inventar sustancias como el éter con propiedades inconmensurables, no factibles de ser medidas, para **“explicar”** la presencia de espacios aparentemente vacíos. La crítica la inició Galileo y más adelante la generación que le sucedió la continuó y la resolvió.

Años más tarde en el año de 1616, Galileo Galilei, abandonó el cargo de profesor en la universidad de Padua, y regresó a Florencia, en donde se convirtió en el adalid de la tesis de Copérnico. Es muy importante mencionar que en su publicación de 1632 (Diálogos sobre los dos Grandes Sistemas del Mundo), a pesar de ciertas precauciones tomadas en su presentación, y contando con el apoyo del papa Urbano VIII, el libro fue prohibido en ese mismo año, y Galileo fue citado ante el tribunal de la Inquisición. Un año más tarde tuvo lugar, la abjuración de Galileo, en la sala de honor del convento de Santa María Sopra Minerva. Después de este penoso proceso, el ilustre científico fue sometido a severa vigilancia primero en una residencia cerca de la ciudad de Siena, y después en las afueras de Florencia, en Arcetri, donde reanudó algunos de sus trabajos sobre mecánica, los cuales expuso en una obra, titulada; **“Diálogos de las Nuevas Ciencias”**, obra que se imprimió clandestinamente en Ámsterdam, en el año de 1638. Finalmente durante los últimos años de su vida, Galileo sufrió de una ceguera parcial, y a finales de 1637, quedó completamente ciego. Uno de los mejores honores que recibió Galileo Galilei, por sus contribuciones a la ciencia fue la entrada a la Academia de Ciencias Florentina, en donde ocupó el cargo de profesor de matemáticas en 1585. Murió el día 8 de enero de 1642, en Arcetri cerca de la ciudad de Florencia en Italia, a sus 78 años de edad.

2.4 EL BARÓMETRO DE TORRICELLI

Casi a mediados del siglo **XVII**, sobresalió otro de los científicos, cuyas contribuciones a la mecánica de los fluidos, fueron de gran ayuda para el desarrollo de esta ciencia; **Evangelista Torricelli (1608 – 1647)**, compañero inseparable de Galileo en los últimos tres meses de su vida. En el área de los fluidos, sobresalen sus estudios sobre el descubrimiento del principio del barómetro de mercurio, y con el resultado de estos estudios demostró que la presión atmosférica determina la altura, a la cual un fluido se eleva en un tubo invertido sobre el mismo líquido (relacionó la altura barométrica con el peso de la atmósfera). También aplicó el análisis de las trayectorias parabólicas de los objetos, en caída libre, a la geometría de los chorros en los líquidos.



Figura 2.13 Evangelista Torricelli
(1608 – 1647)

Evangelista Torricelli distinguido físico y matemático de origen italiano, nació el día 15 de octubre de 1608 en la ciudad de Faenza (Italia). En los primeros años de su vida se educó en compañía de sus padres, poco tiempo después realizó estudios de educación universitaria en el colegio jesuita de Faenza, donde adquirió ciertos conocimientos y habilidades sobre el área de; *matemáticas, física y filosofía*. Mas tarde ingresó al Colegio Romano en Roma, donde demostró un gran talento, ante su maestro, el abad **Benedetto Castelli (1577 – 1644)**, discípulo de Galileo y famoso por descubrir también el principio

de la continuidad. Fue realmente en esta institución, donde Torricelli adquirió ciertos conocimientos y habilidades sobre: **matemáticas, mecánica, hidráulica y astronomía**; además, en dicha institución también recibió una educación de tipo privado por parte de su maestro Benedecto Castelli. Años más tarde, mientras recibía lecciones, Torricelli se convirtió en secretario de Castelli; puesto que desempeñó durante 1626 y 1632. Poco tiempo después, debido a tales causas, asumió el control de las clases que impartía su maestro, cuando por alguna razón, él estaba ausente en Roma. Posteriormente durante el periodo comprendido entre 1641 y 1642, Torricelli fue nombrado secretario de Galileo y más tarde fue nombrado sucesor matemático de la corte de Fernando II de Toscana, puesto que ocupó hasta su muerte en Florencia.



Figura 2.14 Evangelista Torricelli invitado por el anciano Galileo Galilei para discutir y escribir sus últimas ideas en el año de 1642.

Es muy importante mencionar que Torricelli fue el primer hombre que creó el vacío, y que descubrió el principio del barómetro. En el año de **1643**, Evangelista Torricelli propuso un experimento que posteriormente llevó a cabo su colega *Vincenzo Viviani* (1622 - 1703), y sirvió para demostrar que **la presión atmosférica determina la altura, a la cual un fluido se eleva en un tubo invertido sobre el mismo líquido**. Figura 2.15. Este concepto lo llevó a la construcción del barómetro de mercurio. Figura 2.16.



Figura 2.15 El experimento de Torricelli

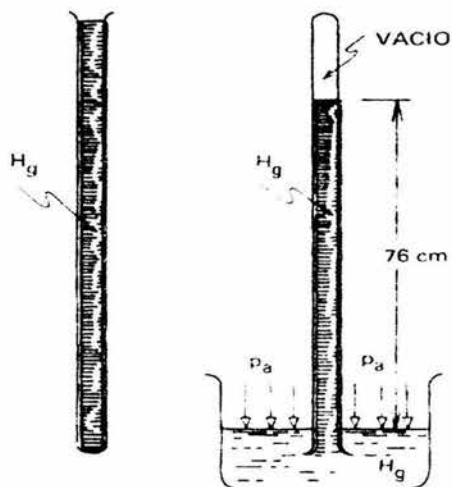


Figura 2.16 Tubo y barómetro de Torricelli para determinar la presión atmosférica al nivel del mar.

Con el resultado de estas investigaciones, este científico, se interesó más por el estudio de la presión atmosférica, y con el resultado de estos trabajos logró acabar con el mito de la imposibilidad del vacío. Para el año de 1644, Evangelista Torricelli formuló el teorema que ahora lleva su nombre; **Teorema de Torricelli**, y que relaciona la velocidad de salida de los líquidos, a través de un orificio, siendo esto proporcional a la raíz cuadrada de la altura del líquido. La expresión que relaciona el fenómeno es la siguiente:

$$V = \sqrt{2g \cdot h}$$

Donde: V ; es la velocidad de salida del líquido a través del orificio

g ; es la fuerza de gravedad

h ; es el valor de la altura a la que se encuentra el líquido

Dicha expresión es el resultado de analizar las trayectorias parabólicas de los objetos, en comparación con la geometría de los chorros en los líquidos. Esta última contribución fue una de las más importantes, durante el desarrollo de la carrera científica de Torricelli, y con el resultado de esta investigación fue reconocido como **el fundador de la hidrodinámica**. Debido a que se ocupó de diversos problemas en forma teórica y experimental.

Entre algunas de las aportaciones matemáticas con las que contribuyó Torricelli al desarrollo de esta ciencia exacta, sobresalen: el uso de los métodos infinitesimales, determinado así el punto en el plano de un triángulo, tal que la suma de sus distancias a los vértices es un mínimo (**centro isogónico**). En el año de 1641, demostró que *al rotar figuras tridimensionales, un polígono regular podía rotar sobre su propio eje de simetría*. Dicho trabajo fue publicado en el año de 1644. También logró calcular el área y el centro de gravedad de una cicloide, así mismo encontró cual era la longitud del arco de la cicloide, o sea, aquella curva trazada por un punto sobre la circunferencia de un círculo en rotación. Una de sus demostraciones más famosas en el campo de las matemáticas, resultó de analizar los métodos indivisibles, al cubrir curvas de tipo indivisible, tomando como base los trabajos del matemático italiano **Cavalieri (1548 – 1647)**. Con estas herramientas, Torricelli logró mostrar que rotando el área ilimitada de una hipérbola rectangular entre el eje (y), y un punto

fijo sobre la curva, daba como resultado un volumen finito, cuando rotaba alrededor del eje (y).

Evangelista Torricelli, también destacó como un hábil pulidor de lentes, ya que destacó con la invención y construcción de diferentes telescopios de diversas formas y tamaños, al igual que simples microscopios. De hecho con este oficio, que él aprendió, obtenía la mayor parte de sus ganancias. En el año de **1644**, publicó uno de sus mejores trabajos, el cual tituló; **“Ópera geométrica”**. En dicho trabajo, Torricelli expuso algunos temas sobre: la mecánica de los fluidos y el movimiento de los proyectiles (Tratado De Motu gravium).

Entre algunos de los honores que recibió Evangelista Torricelli por sus contribuciones a la ciencia, sobresalen: algunos reconocimientos que obtuvo en la ciudad de Florencia, por su brillante carrera en el área de la enseñanza de las matemáticas y la física, así como la elección de miembro de la Academia de Ciencias Florentina en el año de 1642. Murió el día 25 de octubre de 1647, en la ciudad de Florencia (Italia), cerca del municipio de Toscana, a la edad de 39 años a consecuencia de tifoidea.

2.5 LA LEY DE BOYLE – MARIOTTE

Años después de la invención del barómetro de mercurio asociado a Torricelli en 1643, se dio la creación de la bomba de aire, atribuida al físico alemán **Otto von Guericke (1602 – 1686)**, siendo este dispositivo, la primera máquina de obtención de vacío en el año de 1650.

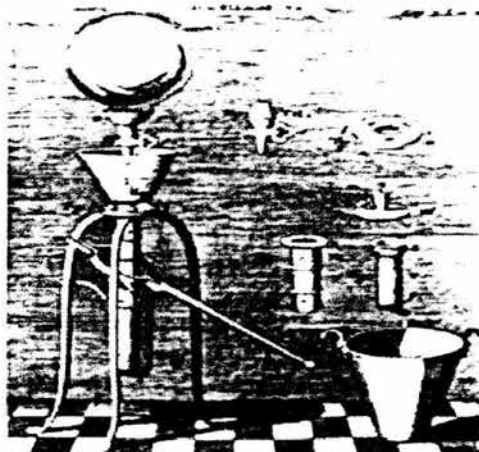


Figura 2.17 Bomba de aire atribuida al físico Otto von Guericke en 1650.

A principios del año de 1654, Otto von Guericke, llevó a cabo su famosa experiencia de **“Los hemisferios de Magdeburgo”**, constituida por dos hemisferios huecos. Una vez creado el vacío en el interior de los mismos, se necesitó la fuerza de dieciséis caballos para poder separarlos.



Figura 2.18 La famosa experiencia de los hemisferios de Magdeburgo en 1654.

La combinación de estos dos experimentos (el barómetro de Torricelli y la bomba de aire atribuida al físico alemán Otto von Guericke). Al igual que la famosa experiencia de los hemisferios de Magdeburgo, fue llevada a cabo antes de 1660 por **Robert Boyle (1627 – 1691)**, dando como resultado la **máquina Boyleana**, considerada como el primer medidor de presiones subatmosféricas. Boyle logró obtener una presión de aproximadamente 6mm de Hg (6 torr), y su diseño experimental fue durante dos siglos la única forma disponible de medir vacío. Figura 2.20.



Figura 2.19 Robert Boyle
(1627 – 1691)

Robert Boyle distinguido químico y físico de origen inglés, es considerado como el padre de la química moderna por sus aportaciones a la alquimia y a la iatroquímica. Nació el día 25 de enero de 1627 en la ciudad de Lismore, Waterford (Irlanda). Su padre fue un distinguido hombre de negocios llamado **Richard Boyle (1566 – 1643)**, y su madre en cambio, una humilde mujer al cuidado de sus dos hijos. En los primeros años de su vida se educó en compañía de sus padres, poco tiempo después llevó a cabo sus primeros estudios de educación primaria, en una institución de tipo privado; **el Colegio Eton de Inglaterra**. En dicho colegio sobresalió como uno de los mejores alumnos de su época, puesto que destacó en la mayoría de sus asignaturas, entre estas; *matemáticas, francés y religión*. En el año de 1639, Robert Boyle fue enviado por su padre a Europa, y poco tiempo después visitó la ciudad de

Genova en Italia, donde recibió una educación de tipo privado, puesto que recibió lecciones de: francés, latín, retórica y religión. Más tarde comenzó a proyectarse hacia el estudio de las matemáticas, y algunos de sus primeros trabajos versaban sobre; **aritmética geometría y fortificaciones**. A finales del año de 1641, Robert Boyle efectuó su primera visita a Venecia, y a principios de 1642, visitó Florencia, pocos días después durante su estancia en aquella ciudad Galileo Galilei murió en Arcetri, un poblado cerca de Florencia. Dicho acontecimiento lo influenció mucho, y poco tiempo después estudio cuidadosamente los trabajos de Galileo. De esta forma, Boyle se convirtió en un partidario fuerte de la filosofía de Galileo, y a partir de este momento creyó fuertemente en el nuevo acercamiento de las ciencias, al estudiar el mundo a través del desarrollo de las matemáticas y la mecánica.

Entre las aportaciones más importantes con las que contribuyó Robert Boyle, para el desarrollo de la ciencia de los fluidos, sobresalen: una gran variedad de estudios y experimentos, referentes a los gases ideales, al hacer uso de **una bomba de vacío**, y así notó que al extraer el aire de una cámara se extinguía el fuego y se morían los animales que estaban adentro; además, la columna de mercurio del barómetro descendía. Figura 2.20.

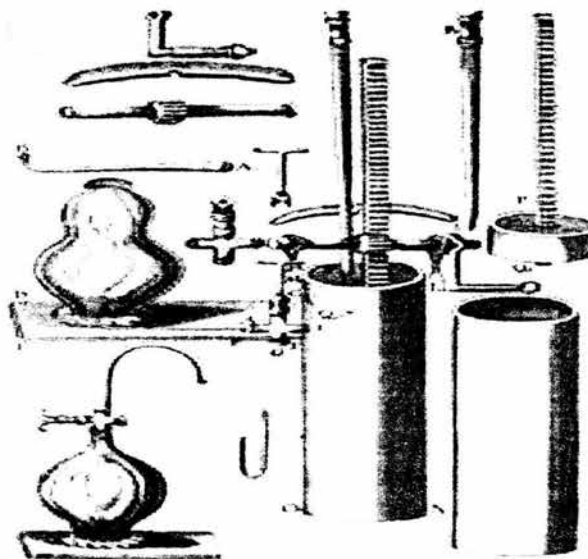


Figura 2.20 Bomba de aire que utilizó Robert Boyle, para demostrar la famosa ley que lleva su nombre.

Poco tiempo después, debido al éxito que tuvieron estos experimentos, Robert Boyle anunció y presentó su famosa ley en la que indica que; **a bajas presiones, la presión de un gas es inversamente proporcional con el volumen cuando; “la temperatura del sistema se mantiene constante”** (1660), y en 1662, publicó uno de sus mejores trabajos, el cual tituló:

“New Experiments, Physico – Chemical”.

En estos trabajos, Robert Boyle, presenta toda una serie de experiencias haciendo uso de una bomba de vacío, las cuales fueron de gran ayuda para el desarrollo de su ley, además menciona que durante los experimentos requirió del apoyo de **Robert Hooke (1635 - 1703)**, a quién empleó como su ayudante durante el desarrollo de la bomba. Cabe mencionar que con el resultado de estos descubrimientos Robert Boyle, había demostrado entre otras cosas, que el sonido no viajaba en el vacío, y había probado que la llama producida en la bomba requería del aire (investigó las propiedades elásticas del aire), y reconoció el papel del oxígeno en la combustión, y en la respiración. En el año de 1661, publicó un libro titulado; **“The Sceptical Chemist”** (El químico escéptico), el cual tenía por objetivo eliminar de la química el lenguaje intrascendente. Es muy importante mencionar que este libro, fue uno de los primeros textos a nivel científico, en donde la química se diferencia por primera vez de la alquimia y de la medicina. Boyle demostró que la química era una ciencia en la que la experimentación rigurosa y los métodos cuantitativos daban resultados reproducibles. Él fue el primero que dio una definición moderna de los elementos químicos. Algunos otros experimentos de Boyle concernían sobre: la calcinación de los metales y la distinción entre ácidos y álcalis; él fue el primer químico, que utilizó indicadores que cambiaban de color con la acidez.

En el año de 1666, publicó otro libro titulado; **“Hydrostatic paradoxes”**, en donde presenta toda una serie de importantes descubrimientos sobre **los efectos de la presión en los fluidos**. Finalmente durante los últimos años de su vida, Boyle, se dedicó por completo al estudio de la religión. Entre algunos de los honores que recibió Sir Robert Boyle por sus contribuciones a la ciencia, sobresalen: algunos reconocimientos que obtuvo en Londres, así como la elección de miembro de la Real Sociedad de Londres en el año de 1663. (Fue uno de los primeros fundadores de la Real Sociedad en 1644). De igual forma, en 1680 fue nombrado Presidente de la Real Sociedad de Londres. Murió el día 30 de diciembre de 1691, en la ciudad de Londres Inglaterra, a sus 64 años de edad.

2.5.1 EL EXPERIMENTO DE BOYLE Y EL ENSAYO SOBRE EL AIRE, PUBLICADO POR EDME MARIOTTE EN 1676.

A partir de la diversa serie de experimentos realizados por Robert Boyle, en el año de 1658, con respecto al comportamiento de los gases, fue como determinó la relación inversa y proporcional entre; la presión y el volumen, haciendo uso del medidor de presiones ó bomba de vacío, que creó expresamente para él. El procedimiento fue colocar en una sección de la bomba el barómetro de Torricelli dentro de un recipiente cerrado del cuál extraía el aire, lo que provocaba que descendiese el mercurio del tubo igualándose los niveles de este y la cubeta. Con ello pretendía poner de manifiesto que la causa responsable de los resultados anteriores era la presión atmosférica y no el horror al vacío que succionaba ó atraía el aire. En defensa de estas ideas tradicionales aparece en escena un jesuita belga, llamado **Franciscus Linus (1595 – 1676)**, quién afirmaba que sobre el mercurio del tubo y del recipiente había una extraña cuerda e invisible, que denominaba "**funiculus**", y que tiraba del mercurio hacía arriba a medida que el aire se iba enrareciendo. Figura 2.21.

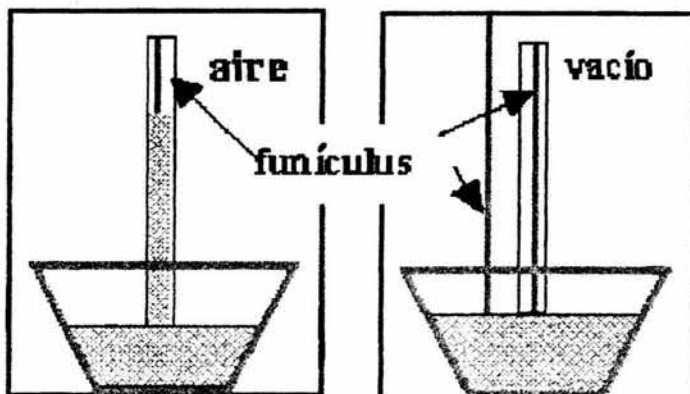


Figura 2.21 Medidor de presiones ó bomba de vacío para determinar la presión atmosférica (máquina boyleana).

En la figura 2.21, se ilustra un medidor de presiones ó bomba de vacío, el cual fue de gran utilidad para medir el vacío. Este diseño experimental estaba conformado por un barómetro de Torricelli (medidor de mercurio (Hg) de Boyle), y un contenedor ó recipiente, expuesto al aire y al vacío. Es muy importante y evidente hacer notar que en aquella época; el nacimiento de lo que hoy

llamamos ciencia moderna se buscaban explicaciones que actualmente no tendrían demasiado crédito. Y fue gracias a Franciscus Linus cuando Boyle publicó de nuevo en 1662, una nueva serie de medidas experimentales que relacionan la presión con el volumen, cuyo producto afirmaba que se mantenía constante. Pero esto lo hace tomando en cuenta que el no había encontrado esa relación entre sus propios datos, sino que fue advertido de ello por **Richard Towneley (1612 – 1680)**. Al parecer fue este científico inglés en compañía de **Henry Power (1624 – 1690)**, los que propusieron a consecuencia de experiencias realizadas en el año de 1653, esta contribución referente a los gases ideales, pero a pesar de todo ninguno de los dos hizo alguna publicación al respecto. Sin embargo, las paradojas de la vida hicieron que, a pesar de que Boyle reconociera que la paternidad inicial de la idea no fuera suya, los exegetas de su obra se la atribuyeran a él. Finalmente cabe resaltar que Robert Boyle en sus experimentos nunca especifica la temperatura a la cual manejó las relaciones entre presión y volumen, quizá porque daba por supuesto que la temperatura permanecía constante. Lo cierto es que en defensa del rigor científico, hay que esperar a que en 1676, **Edme Mariotte (1620 – 1684)**, encontrará de nuevo los mismos resultados que Boyle, y aclara la relación; $PV = k$, relación válida si se mantiene la temperatura constante, y por eso luego a esa relación se le conoce comúnmente como; “La ley de Boyle – Mariotte”.



Figura 2.22 Edme Mariotte
(1620 – 1684)

Edme Mariotte distinguido físico y sacerdote de origen francés, es considerado como el científico más importante de su época, y recordado en Francia como **el padre de la hidráulica**. (Fue uno de los pioneros de la física experimental). Nació el día 29 de abril de 1620 en la ciudad de Dijon (Francia). En los primeros años de su vida se educó en compañía de sus padres, poco tiempo después llevó a cabo sus primeros estudios en un monasterio cerca de la ciudad de Dijon (Saint – Martín – sous Beaune), en donde fue ordenado sacerdote a la edad de veinticinco años. Años más tarde sobresalió por sus estudios en el campo de la física experimental, y en 1676, publicó un trabajo, el cual tituló; **“Ensayo sobre el aire”**. En dicho trabajo estableció y formuló después de Boyle; **“la ley de compresibilidad de los gases”**, aunque de manera independiente y más completa que su colega, al establecer que la presión y el volumen de un gas son inversamente proporcionales si se mantiene la temperatura constante. Así él observó que; al elevarse la temperatura de una muestra de aire su volumen también aumentaba, y al disminuir la temperatura el volumen también disminuía, observación que lo llevó a concluir que estas variaciones era directamente proporcionales. Cabe mencionar que en este trabajo (Ensayo sobre el aire), introdujo la posibilidad de pronosticar el tiempo atmosférico basándose en las variaciones barométricas. Un aspecto que es muy importante mencionar con respecto a la ley de compresibilidad de los gases, es que los autores nunca intercambiaron ninguna información al respecto, y debido a la duplicidad de los autores, la ley física que explica este comportamiento gaseoso es conocida como **la ley de Boyle – Mariotte**:

$$P \propto \left(\frac{1}{V} \right) \quad P = \left(\frac{K}{V} \right)$$

También puede expresarse de esta forma:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 = K$$

Donde: P ; es la presión del sistema

V ; es el volumen del gas

K ; es una constante de proporcionalidad.

La expresión anterior es la que mejor representa y relaciona la ley de compresibilidad de los gases (Ley de Boyle – Mariotte), cuyo enunciado es el siguiente; ***“A bajas presiones y a temperatura constante, la presión de un gas varía en razón inversa y proporcional con el volumen”***. Y en honor a los dos científicos, dicha ley ó contribución referente a los gases ideales lleva su nombre.

Algunas otras investigaciones que efectuó Edme Mariotte concernían sobre hidráulica y algunos de los problemas que abordó fueron los siguientes: *el flujo de agua a través de orificios, presión hidrostática, presión de los vientos y la elasticidad del aire. De igual forma efectuó investigaciones sobre; Hidrodinámica.* También realizó investigaciones sobre: la caída de los cuerpos, los colores y la teoría de la música. Es muy importante mencionar que Edme Mariotte fue el primer científico en Francia, que llevó al estudio de la física, el espíritu de la observación y la duda, además, expresó en sus enseñanzas que la precaución y la timidez son necesarias para aquellos que cuestionan a la naturaleza, así como de interpretar sus respuestas.

En el año de 1678, publicó un trabajo titulado; ***“Essai de logique”*** (Ensayo sobre la lógica), en donde enumera las reglas del razonamiento científico, así como los principios fundamentales de este. Dicho ensayo sirvió para indicar que la investigación experimental es necesaria para el establecimiento de la verdad. En el campo de la fisiología descubrió el punto ciego de la retina que no presenta sensibilidad a la luz por ser el lugar de conexión con el nervio óptico. En el año de 1660, emprendió algunas otras investigaciones sobre; *las deformaciones elásticas de los sólidos, y en ese mismo año, enunció una ley al respecto.* Una de sus mejores obras, en el campo de la hidráulica, fue titulada:

“Traité du Mouvement des eaux et des autres corps fluides”.

Dicha obra contenía la mayor parte de sus investigaciones en relación con; la hidráulica, y fue publicada en París en **1686**, dos años después de su muerte. Entre algunos de los honores que recibió Edme Mariotte por sus contribuciones a la ciencia, sobresalen: algunos reconocimientos que obtuvo en Francia, así como la elección de miembro de la Academia de Ciencias Francesa en 1666. (Fue uno de los primeros fundadores de la Academia de Ciencias en 1666). Murió el día 12 de mayo de 1684, en París - Francia, a sus 64 años de edad.

2.6 EL PRINCIPIO DE PASCAL

Después de todas estas aportaciones en el desarrollo de la mecánica de los fluidos, aparece en la historia de esta ciencia, el gran sabio y erudito francés **Blaise Pascal (1623 – 1662)**. Considerado como uno de los máximos genios del siglo XVII, por sus brillantes aportaciones en el campo de la física y de las matemáticas. En el área de los fluidos se le atribuyen un gran número de estudios e investigaciones sobre: los principios del barómetro de mercurio, la prensa hidráulica y la transmisión de la presión en los fluidos. Dichas investigaciones fueron de gran ayuda para el desarrollo de esta ciencia, ya que con estas, se aclararon finalmente los principios fundamentales de la hidrostática.



Figura 2.23 Blaise Pascal
(1623 – 1662)

Blaise Pascal distinguido filósofo, físico y matemático de origen francés, nació el día 19 de junio de 1623 en la ciudad de Clermont – Ferrand, Auvergne (Francia). En los primeros años de su vida se educó en compañía de su padre **Étienne Pascal (1588 - 1651)**, y de sus hermanas, puesto que a la edad de tres años quedó huérfano de madre. En el año de 1631, cuando solo contaba con ocho años de edad, ya asistía a las grandes reuniones de sabios, en las que él mismo participaba. Mas tarde bajo el tutelaje de su padre Pascal, comenzó a destacar como prodigioso matemático, y a la edad de diecisiete años, formuló

uno de los teoremas más famosos de la geometría proyectiva, mejor conocido como; **el teorema de Pascal**. Dicho teorema también incluía un magnífico tratado de las cónicas, en relación a la geometría del hexágono, el cual publicó en 1639. En el año de 1642, inventó la primera calculadora "**la Pascalina**" con la cual se podían calcular adiciones y subtracciones, siendo esta muy útil para su padre, cuando él fue nombrado, asistente fiscal en la ciudad de Normandía en 1643.

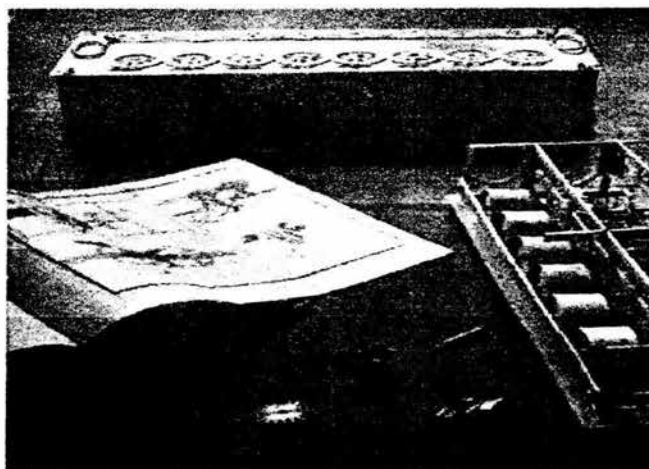


Figura 2.24 Calculadora ó máquina sumadora, inventada por el gran genio Blaise Pascal en el año de 1642.

En el año de 1632, Pascal y su familia se mudaron a París, y en 1647 este científico, llevó a cabo una serie de experimentos sobre: **los efectos de la presión atmosférica**. Dichos experimentos fueron de gran ayuda para el desarrollo de sus investigaciones, debido a que con estas logró demostrar, la existencia del vacío, y en ese mismo año publicó un trabajo, el cual tituló; "**Nuevos experimentos sobre el tratado del vacío**". Un año más tarde, a mediados del año de **1648** volvió a repetir los mismos experimentos, y con el resultado de estas investigaciones, observó que; **el valor de la presión atmosférica, disminuía con la altura, y dedujo la existencia de un vacío sobre la superficie de la atmósfera**. Dichos experimentos sirvieron para establecer totalmente los principios del barómetro de mercurio, y así logró demostrar que la presión barométrica debía variar en relación con la altura. Este experimento fue realizado por Pascal en lo alto de una montaña, y así notó, que el valor de la presión barométrica, era inferior al valor que había encontrado al nivel del mar. De esta forma, logró deducir que el valor de la presión barométrica,

debería de dar una lectura de cero en el vacío. Es muy importante mencionar que todos estos descubrimientos fueron de gran ayuda para el desarrollo de esta ciencia, ya que con estos, Pascal verificó las hipótesis del físico italiano Evangelista Torricelli (1608 – 1647), en lo que concierne a los efectos de la presión atmosférica, sobre el equilibrio de los líquidos. Así fue como descubrió la utilidad del barómetro de mercurio, como altímetro, e investigó la estática de los fluidos, comprobando que la presión en el interior de un fluido es proporcional, a la columna de fluido que hay sobre ese punto, y a la densidad del mismo. Otro aspecto que es muy importante mencionar es que gracias a los intereses científicos de Blaise Pascal, quedó abandonada en forma definitiva la concepción del **“horror vacui”**, puesto que anteriormente no había podido ser explicada en términos de la presión atmosférica. En el año de **1653**, Pascal comenzó a escribir uno de sus mejores trabajos, el cual tituló:

“Traitez de l'equilibre des liqueurs”.

Dicho trabajo fue publicado en París en el año de 1663, y fue de gran ayuda para el desarrollo de esta ciencia, puesto que esta serie de estudios, incluían el famoso; ***Principio de Pascal:***

“La presión ejercida sobre un fluido en equilibrio, se distribuye por igual en todos los sentidos y con la misma intensidad”.

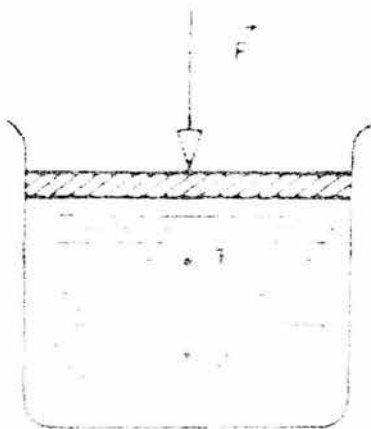


Figura 2.25 El aumento de la presión en punto (1) se transmite completamente al punto (2).

En la figura 2.25, se ilustra un sistema, el cual contiene (agua) en estado de equilibrio, en el sistema se muestran dos puntos denominados como (1) y (2), donde la presión es la misma. Si se aumenta la presión en el punto (1), se tiene un incremento de presión ΔP_1 en este punto, debido al efecto que ejerce la fuerza del pistón sobre la superficie del líquido, dando como resultado un segundo aumento de la presión en el punto (2), el cual provoca un incremento de presión ΔP_2 para este punto. Por lo tanto, como el incremento de la presión en los dos puntos es el mismo, se tiene la siguiente ecuación:

$$P_2 = P_1 + \rho \cdot g \cdot h$$

Está es la ecuación fundamental de la hidrostática, y la que mejor representa los efectos de la presión, en relación al equilibrio de los líquidos. Dicha ecuación es válida si:

$$\Delta P_2 = \Delta P_1$$

Del principio de Pascal se concluye que la presión sobre una superficie considerada en el interior de un líquido, es proporcional a la profundidad a la que se encuentra; **presión hidrostática:**

$$P = P_e \cdot h$$

Donde: **P**; es la presión hidrostática, **P_e**; es el peso específico del líquido y **h**; es la altura del líquido. En la siguiente figura, se ilustra una parte del equipo experimental que utilizó Blaise Pascal para demostrar y completar los principios fundamentales de la hidrostática, el cual incluye; **bombas, jeringas y sifones.**

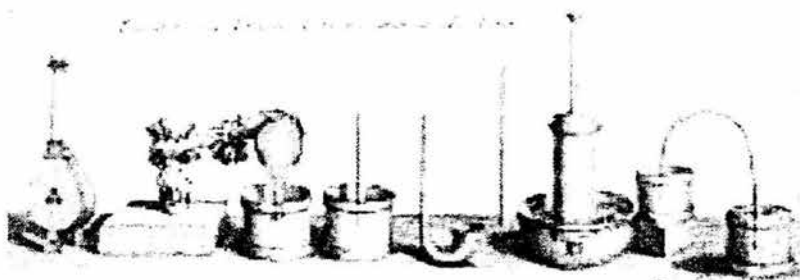


Figura 2.26 Equipo experimental que utilizó Pascal en el año de 1648.

El principio de Pascal presenta algunas aplicaciones en dispositivos de uso frecuente, los cuales multiplican una fuerza aplicada y la transmiten a un punto de aplicación. Los ejemplos más comunes incluyen; *la prensa hidráulica, el gato hidráulico y los frenos hidráulicos para el caso de los automóviles.*

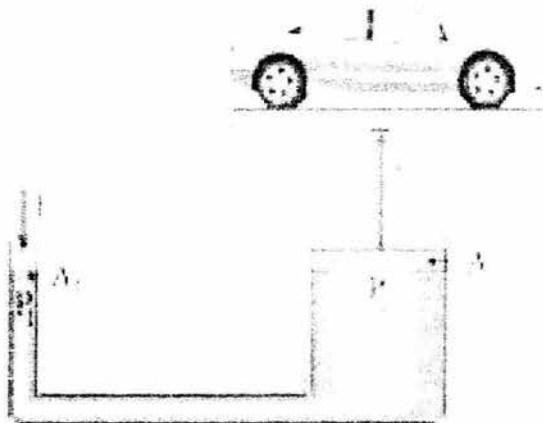


Figura 2.27 Los elevadores automáticos de los automóviles como dispositivo multiplicador de fuerzas (Prensa hidráulica).

En la figura 2.27, se ilustra una de las aplicaciones que tiene la prensa hidráulica, como dispositivo multiplicador de fuerzas. Un ejemplo de ello se tiene para el caso de los elevadores automáticos de los automóviles. Dicho dispositivo está constituido por dos cilindros de secciones diferentes, dentro de los cuales se desliza un pistón. Ambos cilindros están conectados por medio de un tubo a partir de la base de cada pistón. Este dispositivo permite equilibrar mutuamente la aplicación de una fuerza grande, a partir de la aplicación de otra fuerza pequeña. Esto es posible porque la fuerza de presión aplicada sobre las dos superficies es la misma. Por lo tanto:

$$P = \frac{F}{A}$$

Así al aplicar una fuerza grande de mayor resistencia, denotada como (F_2), requerirá de una superficie mayor, la cual es equilibrada mediante la aplicación de otra fuerza pequeña, denotada como (F_1), aplicada sobre una superficie menor.

La siguiente expresión, es la que mejor representa la relación que existe, entre; las fuerzas de presión equilibradas a través de este dispositivo hidráulico (Prensa hidráulica). Figura 2.27.

$$\frac{F_2}{A_2} = \frac{F_1}{A_1}$$

Cabe mencionar que una de las unidades de presión, en el sistema internacional de unidades; **S. I**, lleva el nombre de Blaise Pascal (**el Pascal**), y en honor al científico francés, a dicha relación se le conoce con ese nombre:

$$1Pa = 1 \frac{N}{m^2}$$

Algunos trabajos matemáticos de Pascal, versaban sobre; el tratado de los triángulos aritméticos, y con el resultado de estos trabajos, desarrolló la combinatoria y el cálculo de probabilidades en compañía de su colega **Pierre de Fermat (1601 – 1665)**, en 1653. Dicha combinatoria de probabilidades ha llegado a ser muy importante tanto en estadística social y actuarial, así como en los cálculos de la física teórica moderna. Uno de los últimos trabajos de Pascal, en el campo de las matemáticas, versaba sobre: *la cicloide, con la cual demostró que la curva trazada por un punto sobre la circunferencia, daba como resultado un círculo rotatorio*. De igual forma, aplicó el cálculo indivisible del matemático italiano **Cavalieri (1598 - 1647)**, a la resolución de problemas sobre *el área de cualquier segmento de la cicloide y del centro de gravedad de cualquier segmento*. También realizó importantes aportaciones al desarrollo del cálculo combinatorio e infinitesimal, entre 1653 y 1654.

A finales del año de 1654, después de una visión religiosa, Pascal se retiró de la vida mundana, recluyéndose en un convento, en donde pasaría los últimos ocho años de su vida. En esta etapa de su vida, Pascal se convirtió en asceta; pues dedicó estos años a la teología, con la misma intensidad que se dedicara antes a la ciencia; adoptó el Jansenismo como religión. El trabajo filosófico más importante de Pascal fue una obra titulada (*Pensamientos sobre la religión y otros temas*):

“Pensées sur la religion et sur quelques sujets”

Dicho trabajo fue publicado en París en el año de 1670. En estos trabajos Pascal se esforzó por encontrar un camino entre; **el estado filosófico y la verdad religiosa**. Murió el día 19 de agosto de 1662, en París – Francia, a la edad de 39 años, a consecuencia de un intenso dolor de estomago, el cual terminó por alterar su salud mental.

2.7 LA LEY DE NEWTON DE LA VISCOSIDAD

El siguiente gran avance en el desarrollo de la mecánica de los fluidos, tuvo que esperar a la formulación de las leyes del movimiento, por el matemático y físico inglés; **Isaac Newton (1642 – 1727)**. Estas leyes fueron aplicadas por primera vez a los fluidos, por el matemático suizo *Leonhard Euler* (1707 – 1783), quién dedujo las ecuaciones básicas para los fluidos sin rozamiento (no viscosos). Newton también investigó varios aspectos sobre la resistencia de los fluidos: inercial, viscosa y de onda; descubrió la contracción a chorro.



Figura 2.28 Isaac Newton
(1642 – 1727)

Isaac Newton distinguido físico, matemático y astrónomo de origen inglés, es considerado como uno de los pensadores más geniales que sentó las bases de la física y de las matemáticas. Nació el día 25 de diciembre de 1642 en la ciudad de Woolsthorpe cerca de Lincolnshire (Inglaterra). Miembro de una familia de padres hacendados, cuyos intereses laborales eran los negocios del campo y de sus animales (Granjeros). Su padre fue, un distinguido hombre de negocios también llamado **Isaac Newton (1595 – 1642)**, y su madre en cambio, una humilde mujer al cuidado de los bienes de la familia. En los primeros años de su vida se educó en compañía de su abuela materna y de sus tíos, puesto

que poco tiempo antes de su natalicio, su padre murió a consecuencia de fiebre. Poco tiempo después, llevó a cabo sus primeros estudios de educación primaria en una institución de tipo privado; *el Colegio Grantham*. Más tarde ingresó a la universidad de Cambridge, mejor conocida como **Trinity College (1661)**, en donde adquirió conocimientos y habilidades sobre el área de **matemáticas, física y filosofía**; además, en dicha institución sobresalió como uno de los mejores alumnos de su época. Para el año de 1665, obtuvo el grado por parte de esta institución, y en ese mismo año, una epidemia de peste obliga a las autoridades a cerrar el Trinity College de la ciudad de Cambridge. Debido a tales causas, Isaac Newton se ve obligado a regresar a su ciudad natal, donde permaneció (aislado), lejos de aquella ciudad, durante casi dos años hasta que fueran eliminados los daños de la peste. En estos dos años lleva a cabo una de sus hazañas sin paralelo en la historia del pensamiento humano.

Lo que necesita y no lo sabe, lo inventa; lo que sabe y no le sirve, lo generaliza ó lo cambia sin poder alguno; sobre lo que no entiende medita, observa y experimenta comprobando sus hipótesis. Al finalizar este periodo de la vida de Newton, ya había establecido los cimientos de sus tres contribuciones fundamentales para el desarrollo de la ciencia; **el cálculo infinitesimal, la mecánica y la gravitación (incluyendo su famosa ley de la gravitación universal), así como la teoría de la luz y los colores**. Se cuenta que fue la caída de una manzana, en 1666 (época de la peste en Londres), lo que puso a Newton, en el camino del descubrimiento de la fuerza de gravedad, y pensó, que la atracción de la tierra se extendía hasta la luna, mientras que la atracción del sol se explicaría en base a las leyes de Kepler, sobre el movimiento de los planetas. Y como resultado de estos hechos Isaac Newton, es considerado uno de los pensadores más notables del siglo **XVII**, que sentaría las bases de la física y de las matemáticas de los siguientes siglos. Entre otras aportaciones a la ciencia, también se le acredita a Isaac Newton: la invención del primer telescopio de reflexión en el año de 1671; *experimentó con muchas técnicas para esmerilar vidrios*. Años más tarde, comenzó a escribir una de sus mejores obras, más importantes para toda la ciencia moderna; "Los Principia":

"Philosophiae Naturalis Principia Mathematica"

Dicha obra fue publicada en Londres en el año de **1687**, (en tres volúmenes diferentes). Como resultado de estos trabajos, Isaac Newton, es considerado como uno de los máximos genios de toda la historia.

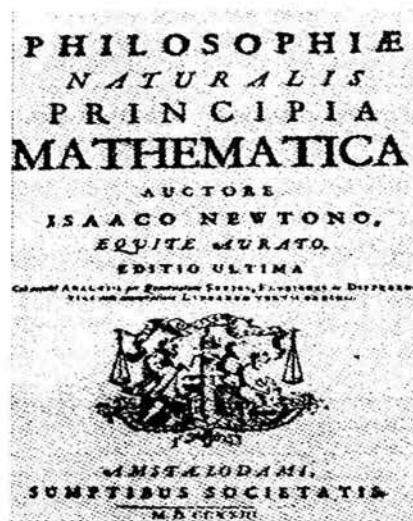


Figura 2.29 Portada de la celebre obra de Isaac Newton; Los Principia (1687).

Algunos temas que expuso Isaac Newton, en esta obra, fueron los siguientes: *los principios básicos de la mecánica, el movimiento de los fluidos, el movimiento de los satélites, las órbitas de los cometas, la precisión de los equinoccios, la teoría de las mareas, la propagación de las ondas del sonido, la teoría cinética de los gases y algunos otros cálculos sobre la densidad de la tierra*. En cuanto a las aportaciones que hizo Isaac Newton, a esta ciencia de los fluidos, cabe mencionar que fueron múltiples y a niveles muy diferentes. Abarcó desde sus fundamentos, en forma indirecta, hasta los meticulosos experimentos que llevó a cabo sobre vórtices (remolinos), y viscosidad (fricción interna). Desde el punto de vista general, el marco teórico, así como el aparato matemático y las leyes físicas que Newton estableció, fueron y siguen siendo, los ingredientes esenciales de la teoría de los fluidos. Es muy importante mencionar que en su libro; ***“Los principios”***, la relación que existía entre esta obra, y la teoría de los fluidos comprendía casi un tercio de esta obra. Debido a que Newton buscaba establecer una teoría alternativa, en contenido, forma y consecuencias, en comparación a la teoría cartesiana. La demoledora crítica de la cosmología cartesiana, que Isaac Newton presenta como preámbulo a su ***“Sistema del mundo”***, es a la vez un cuidadoso estudio del comportamiento de los fluidos. En éste trabajo destacan sus análisis teóricos y experimentales sobre el movimiento de un vórtice y la naturaleza de la fricción interna de los fluidos, apareciendo así la primera definición, estudio y cuantificación de lo que posteriormente se llamó ***la viscosidad de un fluido***.

De igual forma, durante el curso de estos estudios, utilizó correctamente el principio de momentum para evaluar las orbitas e indicó que si hubiera vórtices en el espacio se retardaría el movimiento de los planetas. También llevó a cabo una gran variedad de experimentos sobre la resistencia que presentaban algunos cuerpos en movimiento, para probar que nada de eso ocurre en el espacio. Y con el resultado de estos experimentos, formuló la *velocidad del sonido en el aire, las bases de la viscosidad y la ecuación que ahora lleva su nombre. Ley de Newton de la viscosidad:*

$$\tau_{y,x} = -\mu \frac{dv_x}{dy}$$

Esta es la ley de Newton de la viscosidad, y los fluidos que la cumplen se denominan; **newtonianos**. Dicha ecuación indica que el esfuerzo cortante por unidad de área es proporcional al gradiente negativo de la velocidad local. Donde: μ ; es la constante de proporcionalidad ó coeficiente de viscosidad dinámica. Es muy importante mencionar que todos los gases y la mayor parte de los líquidos sencillos, se comportan de acuerdo con la ley de la viscosidad de Newton. En la siguiente figura, se ilustran dos placas paralelas, de área **A**, separadas por una distancia **Y**. Donde el espacio que las separa esta lleno de un fluido, el cual se desliza a través de estas. La placa inferior viaja a una velocidad (**mayor**), y la placa superior a una velocidad (**menor**). El esfuerzo cortante; τ que actúa entre las placas se define como la fuerza por unidad de área. Dado que la velocidad de la placa inferior decrece con el incremento de **Y**, el gradiente de la velocidad también decrece, y por lo tanto el gradiente de velocidades es negativo.

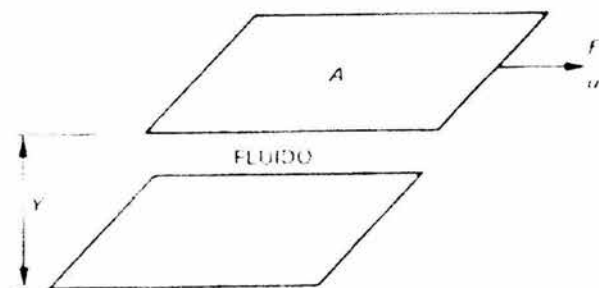


Figura 2.30 Esfuerzo de corte entre dos placas paralelas.

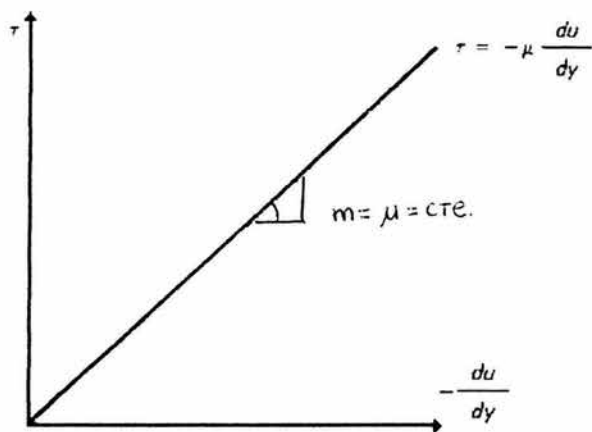


Figura 2.31 Relación lineal entre el esfuerzo de corte, y la velocidad de deformación para un fluido newtoniano.

En la figura 2.31, se ilustra un diagrama, el cual representa el comportamiento de un fluido newtoniano (relación lineal), donde la pendiente de esta relación es la viscosidad (μ). Cuando un fluido presenta una viscosidad constante, en relación con la velocidad de deformación, se trata de un fluido newtoniano. Aquellos fluidos que no cumplen ese comportamiento son llamados fluidos no newtonianos (véase biografía de Eugene Cook Bingham).

Algunas otras aportaciones de Isaac Newton para el desarrollo de esta ciencia fueron: **el descubrimiento de la contracción a chorro, así como la definición de la vena contracta; estableció la relación que existe entre la vena contracta y el esfuerzo de corte; en la vena contracta existe una mayor caída de presión.** Cuando se aborda el tema de medidores de orificio en flujo de fluidos, el valor que se tiene para el coeficiente de orificio, toma el valor de 0.61, cuando la toma posterior está en la vena contracta, y el número de Reynolds es mayor de 20,000.

Años más tarde después de la publicación de los "Principia", Isaac Newton sufrió de una crisis nerviosa, de la cual logró recuperarse (1693). Pero a pesar de todo, no volvió a escribir ni a publicar ningún trabajo científico de carácter importante. Comenzó a interesarse en estudios de tipo religioso, y a escribir trabajos sobre temas de teología. Por esa misma época, también comenzó a interesarse en varios temas relacionados con el campo de la **química (alquimia)**. Pero a pesar de sus numerosos estudios sobre alquimia, no hizo contribución importante en este campo.

En el año de 1696, abandonó el cargo de profesor en la Universidad de Cambridge, y comenzó a buscar una ocupación más lucrativa. En esta ocasión, al ofrecérsele el cargo de director, en una escuela frecuentada por la aristocracia británica, rechazó la oferta por considerar que la retribución no satisfacía sus aspiraciones económicas, y en 1699, fue nombrado director de la Casa de Moneda de Londres, en donde recibió emolumentos muy elevados, que lo convirtieron en un hombre muy rico.

Entre algunos de los honores que recibió Sir Isaac Newton por sus contribuciones a la ciencia, sobresalen: algunos reconocimientos que obtuvo en Cambridge, por su brillante carrera en el área de la enseñanza de las matemáticas Lucasianas (1669), así como la elección de miembro de distinguidas sociedades, entre estas: la Real Sociedad de Londres (1672), y la Academia de Ciencias de París (1699). De igual forma en el año de 1703, fue nombrado Presidente de la Real Sociedad de Londres (puesto que ocupó hasta su muerte), y en 1705, fue nombrado Caballero por la Reina Ana de Inglaterra. Murió el día 20 de marzo de 1727, en la ciudad de Londres Inglaterra, a sus 85 años de edad.

2.8 EL TUBO DE PITOT

Henri de Pitot (1695 – 1771), distinguido ingeniero hidráulico y civil de origen francés, nació el día 3 de mayo de 1695 en la ciudad de Aramon (Francia). En los primeros años de su vida trabajó como asistente de laboratorio en compañía del físico francés *Réaumur* (1683 – 1757), poco tiempo después comenzó su carrera como matemático y astrónomo, y con el resultado de sus trabajos fue seleccionado para entrar a la Academia de Ciencias en el año de 1724. Años más tarde, durante el trayecto de su carrera científica, Henri de Pitot, llegó a estar muy interesado por algunos de los problemas relacionados con el campo de la ingeniería hidráulica, y en 1732, sobresalió con la invención del **tubo de Pitot**, dispositivo que mide la velocidad de los fluidos ó también considerado como un medidor de caudal indirecto. En ese mismo año publicó en París, uno de sus mejores trabajos, el cual tituló:

“Description d’ une machine pour mesurer la vitesse des eaux courantes et la sillage des vaisseaux”.

Dicho trabajo contenía los principios fundamentales sobre la descripción y el funcionamiento de este dispositivo hidráulico.

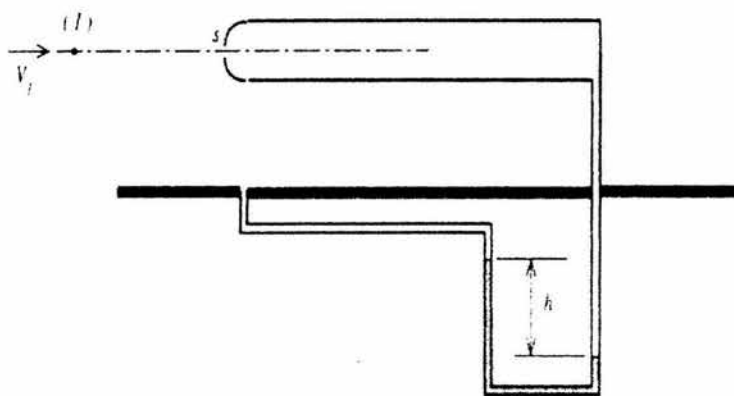


Figura 2.32 Tubo de Pitot ó medidor de caudal indirecto.

En la figura 2.32, se ilustra un tubo de Pitot ó medidor de caudal indirecto, con el que se puede medir la velocidad de los fluidos en un punto determinado. Este medidor mide directamente una diferencia entre; la presión dinámica y estática de los fluidos (dentro y fuera del tubo), el cual consiste de un sistema de tubo doble, hueco y alineado con una cara abierta al flujo y esta cerrado por

uno de sus extremos mediante un tapón redondo, que tiene un pequeño orificio en la línea central del tubo. Existen numerosas aplicaciones tecnológicas del tubo de Pitot, por ejemplo; en los anemómetros para medir la velocidad del viento ó para medir la velocidad de los aviones y en algunos otros casos para medir la velocidad de flujo de gases a baja presión, tal es el caso de los ventiladores y las pruebas para ventilación. Y en honor al científico francés, a dicho instrumento de medición se le conoce con ese nombre. La ecuación que permite obtener la velocidad en el tubo de Pitot, es la siguiente:

$$u_1 = C_{PIT} \sqrt{\frac{2g_c \cdot \Delta P}{\rho}}$$

Donde: u ; es la velocidad puntual

C_{PIT} ; es el coeficiente del tubo de Pitot

ΔP ; es la caída de presión

g_c ; es el factor de conversión

ρ ; es la densidad del fluido.

En algunos casos cuando se presenta fricción interna, para un tubo bien diseñado el valor de C_{PIT} es la unidad. Otros avances con los que contribuyó Henri de Pitot, para el desarrollo de esta ciencia fueron; el análisis de los problemas sobre el flujo de agua en ríos y canales, siendo así como descubrió que mucha de la teoría contemporánea sobre flujo de fluidos era errónea, por ejemplo; la idea de que la velocidad del agua en los canales aumentaba con la profundidad; su principal campo de investigación era el río Sena. También contribuyó con el desarrollo de la enseñanza de la ingeniería (mecánica de fluidos), en una institución que fundó en particular Henri de Pitot en el año de 1755. Mas tarde al ser nombrado Jefe de Ingeniero de la ciudad de Languedoc fue responsable de numerosos proyectos sobre: el mantenimiento y la construcción de diversas obras de tipo civil e hidráulico, entre estas; **puentes, canales y drenajes**. Uno de sus mayores logros fue la construcción de un acueducto para la ciudad de Montpellier (1753 – 86), que incluía una sección con arcos romanos de un kilómetro de longitud. Figura 2.33.



Figura 2.33 Acueducto de la ciudad de Montpellier (Francia), construido bajo la supervisión del ingeniero Henri de Pitot en 1760.



Figura 2.34 Henri de Pitot
(1695 – 1771)

Algunos otros estudios del ingeniero Henri de Pitot, trataban de geometría, trigonometría, geodesia, saneamiento y estructuras; en estas áreas también hizo importantes aportaciones. Entre algunos de los honores que recibió Henri de Pitot por sus contribuciones a la ciencia, sobresalen: algunos reconocimientos que obtuvo en Francia, por su brillante carrera en el área de la enseñanza de las matemáticas, la física y la ingeniería, así como la elección de miembro de distinguidas sociedades, entre estas: la Real Sociedad de Londres y la Academia de Ciencias de París. De igual forma, sobresalió como distinguido socio del grupo de ingeniería; ***The Corps des Ponts et Chaussées***. Murió el día 27 de diciembre de 1771, en la ciudad de Aramon Francia, a sus 76 años de edad.

En dicho trabajo Daniel Bernoulli, indica el uso de los manómetros, la teoría cinética de los gases y la propulsión a chorro, pero en ninguna parte de su libro se encuentra el teorema de Bernoulli. Al igual que el científico Leibnitz (1646 – 1716), en la ecuación de Bernoulli, sólo se consideraban las energías; **potencial y cinética.**



Figura 2.36 Daniel Bernoulli
(1700 – 1782)

Daniel Bernoulli distinguido matemático, físico, filósofo y médico de origen suizo, nació el día 8 de febrero de 1700 en la ciudad de Groningen (Holanda). Miembro de una familia de matemáticos y físicos suizos. Era hijo de Johann Bernoulli (1667 – 1748), y sobrino de Jacob Bernoulli (1654 – 1705), dos investigadores que hicieron aportaciones importantes en el desarrollo del cálculo. En los primeros años de su vida se educó en compañía de su padre, y de su hermano mayor Nicolás Bernoulli II (1695 – 1726), poco tiempo después llevó a cabo sus primeros estudios de educación primaria en su ciudad natal. Más tarde ingresó a la universidad de Basilea, en donde adquirió ciertos conocimientos y habilidades sobre; lógica y filosofía. Cabe mencionar que Daniel Bernoulli al igual que su padre, realmente quería estudiar matemáticas, y durante su estancia en la universidad, estuvo aprendiendo diversos métodos matemáticos sobre el cálculo, a partir de las enseñanzas de su padre y de su hermano. Posteriormente decidió estudiar medicina, y en el año de 1721, obtuvo el título de médico, sin embargo, sus intereses por las matemáticas hicieron que cediera su talento por esta ciencia, y en 1725, prefirió ser profesor

de matemáticas en la Academia Rusa de San Petersburgo. En el mismo año en que empezó a trabajar en la Academia Rusa de San Petersburgo, como profesor de matemáticas, también fue invitado a trabajar en la Academia su hermano Nicolás, pero a pesar de todo, nueve meses más tarde su hermano murió a consecuencia de fiebre. Para el año de 1727, empezó a trabajar en compañía del gran matemático; Leonhard Euler (1707 – 1783), en la Academia Rusa, y en 1731, comenzó a extender sus investigaciones para incluir problemas de la vida y de estadística para la salud. En el año de 1732, regresó a Basilea (Suiza), donde fungió como profesor de anatomía, botánica, filosofía y física en las universidades de Suiza y Groningen.

Entre sus trabajos más importantes relacionados con la mecánica de los fluidos, sobresalen: los relacionados con el campo de la Hidrodinámica. Como ya se dijo en el año de 1738, publicó un libro, titulado; **Hydrodinámica**. En estos trabajos él considera las relaciones entre los diferentes tipos de energía potencial, cinética y de presión, lo que dio origen al **Principio de Bernoulli ó Teoría Dinámica de los fluidos**. También estudió la corriente de los fluidos, y formuló el principio de que la presión ejercida por un fluido es inversamente proporcional al valor de su corriente, así mismo descubrió los principios básicos del comportamiento de los fluidos; consideró el primer análisis correcto sobre el flujo de agua, a partir de un orificio en un contenedor. Dicho análisis fue basado en el principio de la conservación de la energía, el cual había estudiado Daniel, en compañía de su padre en 1720. También discutió el desarrollo de las bombas y de otras máquinas hidráulicas. Un descubrimiento notable aparece en el capítulo 10 de su libro; Hydrodinámica, donde Daniel discute las bases para la teoría cinética de los gases. Y con el resultado de estas investigaciones, proporcionó las leyes básicas para la teoría cinética de los gases, así mismo contribuyó al desarrollo de la ecuación de Van der Waals, propuesta por este último un siglo más tarde.

Entre sus aportaciones más importantes al desarrollo de esta ciencia, la que más destacó fue el teorema que ahora lleva su nombre, y que fue la primera formulación del principio de la conservación de la energía para el caso de los fluidos. La versión moderna del teorema de Bernoulli, cuya formulación general y correcta se debe a Euler, establece que la suma de tres cantidades es igual a una constante:

$$A + B + C = \text{constante}$$

En la expresión anterior los sumandos corresponden a tres formas particulares de energía. El primero tiene que ver con el estado de movimiento (energía cinética), el segundo con la altura a la que se encuentra (energía potencial), y el tercero con la presión (energía de presión). Si la suma de estas tres cantidades ha de permanecer constante es preciso que al aumentar una de ellas, al menos una de las restantes se vea disminuida en la proporción adecuada. Una restricción del teorema de la conservación de la energía, para el caso de los fluidos, según Daniel Bernoulli, es que los efectos de fricción interna (viscosidad), y de compresibilidad en el fluido sean despreciables, es decir, muy pequeños. Bernoulli, con el sólido juicio de un científico de su estatura, además de subrayar la "maravillosa utilidad" de su teorema, advertía el error que podría traer el abuso ó el olvido de sus limitaciones, las cuales eran si acaso intuitivas. *En otras palabras el teorema de Bernoulli, se aplica a aquellos flujos incompresibles y sin rozamiento, el cual afirma que; la energía mecánica total de un fluido incompresible, y no viscoso (sin rozamiento), es constante a lo largo de un línea de corriente.* Las líneas de corriente son líneas de flujo imaginarias que siempre son paralelas a la dirección del flujo en cada punto, y en el caso del flujo uniforme estas coinciden con la trayectoria de las partículas individuales del fluido.

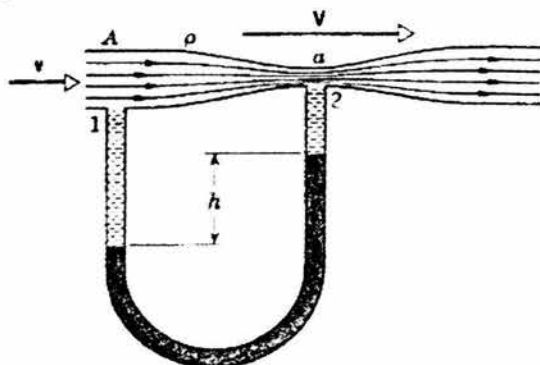


Figura 2.37 Líneas de corriente (imaginarias) en una línea de flujo.

En general el teorema de Bernoulli implica una relación entre los efectos de; la presión, la velocidad y la gravedad, e indica que la velocidad aumenta cuando la presión disminuye. En realidad el teorema dio en aquel entonces, el original enfoque que llevó al planteamiento y solución de diversos problemas, los cuales fueron de gran valor para el desarrollo de la naciente disciplina, y constituyó un vigoroso estímulo para los brillantes dotes de algunos de sus contemporáneos y amigos.

Cabe mencionar que Daniel Bernoulli, experimentó y escribió sobre muchas fases del movimiento de los fluidos. En su libro titulado; “*Hydrodynamica*” (1738), Daniel explica su ecuación, pero no la deduce específicamente de los primeros principios. En realidad fue Leonhard Euler, quién después llevó a cabo la deducción de esa ecuación. Con el resultado de estos trabajos, Bernoulli estableció el principio básico de la conservación de la energía para indicar la relación; *carga – velocidad*. La siguiente expresión es la **ecuación de Bernoulli**, la que es muy útil en flujo de fluidos, pues permite entender el comportamiento de los fluidos ideales:

$$\frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta u^2}{2} + \Delta z \cdot g = cte$$

Como en la época de Daniel Bernoulli, no se podían calcular las pérdidas por fricción en las tuberías, hubo de esperarse hasta el siglo XIX, para que con los trabajos de Darcy, Weisbach, Reynolds y Moody se pudieran calcular. De esta forma, se tiene ahora el famoso **balance de energía mecánica** o “*ecuación de Bernoulli*”, la que es muy útil en flujo de fluidos, cuando se aborda el tema de pérdidas por fricción en tuberías:

$$\frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta u^2}{2g_c} + \Delta z \cdot \frac{g}{g_c} = -\frac{Pot}{M} - \frac{\Sigma F}{M}$$

En la ecuación anterior, el primer término del lado izquierdo, relaciona el valor de la energía de presión, el segundo término relaciona el valor de la energía de cinética, y el tercer término el valor de la energía potencial. Ahora en cuanto a los términos del lado derecho, el primer término relaciona el trabajo o potencia por unidad de masa, y el segundo término relaciona las pérdidas por fricción en la tubería, por unidad de masa. En general este balance de energía mecánica (Bernoulli), se aplica sólo a sistemas; **adiabáticos ó isotérmicos**. Algunos otros estudios de Daniel Bernoulli, concernían sobre: astronomía, gravitación, mareas, magnetismo, corrientes oceánicas y comportamiento de embarcaciones, y debido a al gran interés que tuvo por el desarrollo de la ciencia, obtuvo 15 premios por sus por sus brillantes trabajos, durante el periodo comprendido entre 1725 y 1757. También realizó importantes aportaciones a las teorías de Newton sobre: el cálculo y la mecánica.

Entre algunos de los honores que recibió Daniel Bernoulli por sus contribuciones a la ciencia, sobresalen: algunos reconocimientos que obtuvo en la universidad de Basilea, al igual que la elección de miembro de distinguidas sociedades, entre estas: la Academia de Ciencias de San Petersburgo, la Academia de Ciencias de Berlín, la Academia de Ciencias de París, la Academia de Ciencias de Londres, así como algunos otros reconocimientos que obtuvo por parte de las Academias de las ciudades de; Bolonga, Bern, Turín, Zurich y Mannheim. De igual forma en el año de 1750, fue nombrado distinguido socio de la Real Sociedad de Londres. Murió el día 17 de marzo de 1782, en Basilea (Suiza), a sus 82 años de edad.

2.10 LEONHARD EULER Y LAS ECUACIONES DE MOVIMIENTO.

En el año de 1755 aparecen, una tras otra, las obras clásicas de **Euler (1707 – 1783)**, sobre los fundamentos de la mecánica de los fluidos. El gran genio y matemático más notable del siglo **XVIII**, había asimilado por completo la obra newtoniana, debido a que fue el primero en aplicar las leyes del movimiento de Newton sobre los fluidos, y dedujo las ecuaciones básicas para los fluidos sin rozamiento (no viscosos). De igual forma plasmó todas sus ideas, en un lenguaje mucho más elegante y preciso, ya que formuló las ecuaciones diferenciales de movimiento en su forma general, deduciendo a partir de estas los resultados previos ya conocidos, como el teorema de Bernoulli, dándoles una verdadera dimensión y generalidad.



Figura 2.38 Leonhard Euler
(1707 – 1783)

Leonhard Euler prolífero matemático, físico y astrónomo de origen suizo, nació el día 15 de abril de 1707 en Basilea (Suiza). Considerado como el científico más importante de Suiza, y uno de los tres matemáticos más brillantes de la época, los otros dos son; Gauss y Riemann. En los primeros años de su vida se educó en compañía de sus padres, poco tiempo después ingresó al colegio de la ciudad de Basilea, donde llevó cabo sus primeros estudios de educación primaria. Sus intereses por las matemáticas se debieron a las

influencias de su padre **Paul Euler (1677 – 1750)**, quién se encargó de instruir a su hijo hacia el estudio de las matemáticas. En el año de 1720, ingresó a la universidad, donde tuvo por maestro a **Johann Bernoulli (1667 – 1748)**, distinguido matemático de la época, y famoso por sus enseñanzas. Para el año de 1723, obtuvo el grado de matemático por parte de la universidad de Basilea, cuando solo contaba con diecisiete años de edad, y en ese mismo año provocó grandes aplausos en un discurso probatorio, el cual concernía sobre una comparación entre los sistemas *cartesiano* y *newtoniano*. Poco tiempo después comenzó a estudiar teología, a finales del año de 1723, puesto que su padre deseaba que su hijo ingresara al sagrado monasterio, y orientó a su hijo hacia el estudio de la teología. Es muy importante mencionar que Leonhard Euler, fue un hombre de amplia cultura, ya que contaba con amplios conocimientos sobre; literatura y lenguas orientales, conocía la Eneida de memoria, en lenguas modernas, así como una gran variedad de temas sobre; medicina, botánica, fisiología, geografía y todas las ciencias físicas, como se conocían en su época. En el año de 1727, fue mandado a llamar a petición de la emperatriz de Rusia; Catalina I, para que fuera miembro del profesorado de la Academia de Ciencias de San Petersburgo.

Desde 1727 vivió en San Petersburgo, donde fue nombrado profesor de física a partir de 1730, y de matemáticas a partir de 1733. En el año de 1741, fue mandado llamar por el rey de Prusia Federico II (el grande), para que fuera director y profesor de matemáticas en la Academia de Ciencias de Berlín; puesto que desempeñó hasta el año de 1766. Aunque perdió parcialmente la visión antes de cumplir 30 años, y estaba casi ciego total al final de su vida, produjo numerosas obras matemáticas de carácter importante. En el campo de las matemáticas y de la enseñanza, sobresalen algunas de sus mejores obras, entre estas; Introducción al análisis de los infinitos (1748), donde realizó el primer tratamiento analítico completo del álgebra, la teoría de ecuaciones, la trigonometría y la geometría analítica. También realizó importantes aportaciones al cálculo (incluyendo el cálculo de variaciones), la teoría de los números, números imaginarios, y el álgebra determinada e indeterminada. Cabe mencionar que este gran hombre poseyó una asombrosa facilidad para los números, y el raro don de realizar cálculos mentalmente a largo alcance. Se recuerda que una ocasión, cuando dos de sus discípulos, al realizar la suma de una serie de diecisiete términos, no estaban de acuerdo con los resultados en una unidad de la quincuagésima cifra significativa, se recurrió a Euler, este repasó el cálculo mentalmente, y su decisión resultó ser correcta. Tiene muchas fórmulas y teorías que llevan su nombre, las cuales demuestran su enorme fecundidad y talento por las matemáticas y la física. De hecho existe un número

adimensional en el campo de las matemáticas, el cual es comúnmente conocido como *número de Euler*, cuyo valor con siete decimales es igual al valor de; $e = 2.7182818$. Cabe mencionar que por medio de los trabajos de este gran matemático, los símbolos; e, π , i, llegaron a ser muy comunes para todos los matemáticos; además, él fue quién los reunió en la sorprendente relación; $e^{i\pi} + 1 = 0$. Entre sus aportaciones más importantes con las que contribuyó Euler, al desarrollo de la mecánica de los fluidos, sobresalen: *el establecimiento de las ecuaciones de movimiento, en realidad la primera ecuación de Bernoulli fue derivada por Euler, debido a que demostró que dicha ecuación era una integral de la ecuación de Euler.*

Ecuaciones diferenciales de movimiento para el fluido ideal ó perfecto, propuestas por Euler en 1755:

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}$$

Dichas ecuaciones son el resultado de sus estudios, sobre las ecuaciones de aceleración, para las condiciones de flujo fijo (irrotacional), a régimen permanente bajo los efectos de la gravedad. En ese mismo año, publicó en Berlín uno de sus mejores trabajos, el cual tituló:

“Principes generaux de l' etat d' equilibre des fluides”.

Entre otras aportaciones con las que contribuyó Euler, para el desarrollo de esta ciencia, sobresalen: un gran número de ecuaciones sobre el tratado de la hidráulica; exploró un gran número de consecuencias, y atacó múltiples problemas de carácter práctico, asociados a la maquinaria hidráulica, particularmente *la turbina, la resistencia sobre barcos y la propulsión.*

También fue el primero en explicar el papel que juega la presión en estudios de flujo de fluidos, y el primero en introducir el concepto de **cavitación**, así como el principio de maquinaria centrífuga. Es muy importante mencionar que el estudio de las turbomáquinas hidráulicas como ciencia no se crea hasta que Euler en 1754, publicó su famosa memoria en Berlín sobre maquinaria hidráulica, en la que expuso su teoría sobre las máquinas de reacción:

“Théorie plus complète des machines qui sont mises en mouvement par la reaction de l' eau”.

Dicha memoria fue de gran utilidad para el desarrollo de esta ciencia, puesto que expuso la primera ecuación fundamental de las turbomáquinas; **bombas, ventiladores, compresores y turbinas hidráulicas**, además, dedujo e igualó, el par a la variación de la cantidad de movimiento, de los fluidos a su paso por el rotor.

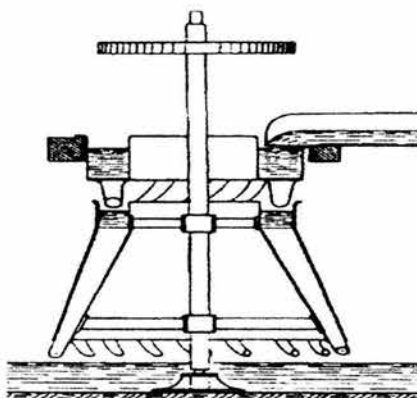


Figura 2.39 Turbina hidráulica propuesta por Euler en 1754.

La siguiente expresión es la ecuación fundamental de las turbomáquinas (ecuación de Euler), y representa un papel muy importante en el estudio de las turbomáquinas hidráulicas y térmicas; pues constituye, la ecuación básica en el estudio de las bombas, ventiladores, compresores, turbinas hidráulicas, turbinas de vapor y de gas. Además expresa la energía intercambiada en el rodete de todas estas máquinas:

$$H_E = H_h = \pm \frac{u_1 \cdot C_{1u} - u_2 \cdot C_{2u}}{g}$$

Donde: H_E ; es la energía específica que absorbe la máquina del fluido

H_h ; es la energía intercambiada entre el rodete y el fluido

u_1 ; es la velocidad absoluta del álabe a la entrada

u_2 ; es la velocidad absoluta del álabe a la salida

C_{1u} ; es la componente circunferencial de la velocidad absoluta del fluido a la entrada

C_{2u} ; es la componente circunferencial de la velocidad absoluta del fluido a la salida

g ; es la fuerza de gravedad.

Es importante mencionar que para el caso de las máquinas generadoras, tales como: bombas, ventiladores y compresores, se utiliza el signo negativo en la ecuación de Euler, y para el caso de las máquinas motoras, tales como: turbinas hidráulicas, turbinas de vapor y turbinas de gas, se utiliza el signo positivo en la ecuación de Euler.

En mecánica de fluidos, existe ahora, un número adimensional que lleva su nombre, y es comúnmente conocido como **el número de Euler**, dicho número relaciona el cociente entre una fuerza de inercia característica, y una fuerza debida al gradiente de presiones:

$$E = \frac{V}{\sqrt{2\Delta p / \rho}}$$

Donde: E ; es el número de Euler

V ; es la velocidad del fluido ó velocidad característica

ΔP ; es la caída de presión

ρ ; es la densidad del fluido.

El número de Euler es el parámetro adimensional de semejanza en los problemas con predominio en que sólo actúan las fuerzas debidas al gradiente de presiones. Y en honor al gran matemático del siglo XVIII, *Leonhard Euler*, a dicha relación se le conoce con ese nombre. Algunos otros estudios de Euler, concernían sobre: *astronomía, mecánica, óptica y acústica*. En estas áreas también hizo importantes aportaciones. Leonhard Euler, recibió en vida un gran número de honores por sus contribuciones a la ciencia, pero en particular, uno de los mejores que recibió fue el nombramiento de socio distinguido de la Real Sociedad de Londres en el año de 1747. Murió el día 18 de septiembre de 1783, en San Petersburgo Rusia, a sus 76 años de edad.

2.11 LA PARADOJA DE D' ALEMBERT

Después de todas estas aportaciones con las que contribuyeron, al desarrollo de la mecánica de los fluidos, estos grandes filósofos del siglo XVIII, vamos a mencionar otro de los contemporáneos, que también es considerado por sus aportaciones a esta ciencia; **Jean le Rond d' Alembert (1717 – 1783)**. Sobresaliente por sus estudios e investigaciones, al proporcionar el concepto de la velocidad y la aceleración, a la expresión diferencial de la continuidad, y a la paradoja de resistencia cero en el movimiento estable, y no uniforme de los fluidos.



Figura 2.40 Jean le Rond d' Alembert
(1717 – 1783).

Jean le Rond d' Alembert distinguido filósofo, físico y matemático de origen francés, nació el día 17 de noviembre de 1707 en París – Francia. Al parecer su padre, fue un distinguido oficial de artillería llamado; **Louis – Camus Destouches (1671 – 1726)**, y su madre en cambio, una humilde servidumbre al servicio de la iglesia. En los primeros años de su vida se educó en compañía de su padre, poco tiempo después llevó a cabo sus primeros estudios de educación primaria, en una institución de tipo privado. Posteriormente ingresó al colegio jansenista de Mazarin, en donde adquirió conocimientos y habilidades sobre matemáticas y derecho. Para el año de 1735, obtuvo el grado por parte de esta institución, y en ese mismo año comenzó a proyectarse hacia el estudio de las matemáticas. A mediados del año de 1739, presentó su primer trabajo,

ante la Academia de Ciencias de París, en donde presenta algunos errores que el mismo había encontrado, en relación con los trabajos del matemático **Reyneau's (1656 – 1728)**, basados en un análisis demostrativo. En 1740, presentó un segundo trabajo bajo la supervisión de **Clairaut (1713 - 1765)**, sobre; *mecánica de fluidos*, el cual fue elogiado y criticado por él. Un año más tarde como resultado de estos hechos fue seleccionado para entrar a la Academia de Ciencias en París, debido a la excelencia de sus trabajos sobre **cálculo integral y mecánica de fluidos**. Cabe mencionar que D' Alembert alcanzó la cima de las matemáticas francesas, dedicando la segunda parte de su vida a estudios de carácter experimental, ya que realizó estudios sobre el movimiento de los cuerpos en el agua en el año de 1739; además, en 1743 estableció y publicó, el denominado principio de la mecánica que lleva su nombre (**Traité de dynamique**), y que introduce al terreno de la estática problemas de dinámica, mediante la introducción de la inercia. Este gran hombre era sobre todo un matemático, y no un físico, además creía que la mecánica era sólo una parte de las matemáticas tal como; el álgebra ó la geometría. La mecánica racional que el fundó, era una ciencia basada en principios simples y necesarios, a partir de los cuales todos los fenómenos particulares podrían deducirse por métodos rigurosos y matemáticos. De igual forma estableció en su tratado de dinámica que la mecánica estaba basada en principios, y no en una evidencia física, lo que aplicó al equilibrio y al movimiento de los fluidos, y en el año de 1744, publicó en París, un libro titulado; **Traité de l'equilibre et du mouvement des fluides**.



Figura 2.41 Libro de D' Alembert.

Dicho trabajo daba una alternativa al tratamiento de flujo de fluidos muy diferente al publicado por Bernoulli. En el año de 1746, D' Alembert participó en la elaboración de la **Enciclopedia Francesa**, que el mismo bosquejó y dividió bajo el programa del esclarecimiento, en compañía del escritor y filósofo francés **Diderot (1713 – 1784)**. Dicha obra representó un papel muy importante durante la época de la ilustración francesa, ya que esta última realizó a las ciencias y a la literatura, y atacó a las fuerzas de reacción representadas por el estado y la Iglesia. Muchos de los trabajos de D' Alembert se centraron en las matemáticas y en las ciencias, desarrollando sus contribuciones principalmente al cálculo diferencial e integral, referidas a las teorías de los números y a las funciones, así como a las contribuciones en los campos de la mecánica y la astronomía. Cabe mencionar que D' Alembert, es considerado como uno de los pioneros más brillantes sobre el estudio de las ecuaciones diferenciales parciales, y de su aplicación de estas a la física. El único problema con sus trabajos es que eran muy buenos desde el punto de vista matemático, pero basados en una evidencia física muy pobre.

Entre sus aportaciones más importantes con las que contribuyó Jean le Rond d' Alembert, al desarrollo de la mecánica de los fluidos, sobresalen: diversos conceptos y métodos analíticos, que el mismo introdujo en sus dos obras básicas sobre fluidos. Demostró lo que se conoce como **la paradoja de D' Alembert en 1752**, y en ese mismo año publicó en París, uno de sus mejores trabajos, el cual tituló:

“Essai d' une nouvelle theorie sur la resistance des fluides”.

Dichas investigaciones demostrarán que bajo régimen permanente, las condiciones irrotacionales de un fluido, no deberían de ofrecer resistencia al movimiento relativo de un cuerpo sumergido. En otras palabras él demostró que no hay resistencia al movimiento cuando un cuerpo se mueve a través de un fluido ideal (es decir, con viscosidad cero), conclusión que no es válida cuando los cuerpos se mueven a través de fluidos reales. La inconsistencia entre la teoría y la práctica se conoce como **“la paradoja de D' Alembert”** y sirvió para demostrar las limitaciones de la teoría en la resolución de los problemas de flujo. Como consecuencia de las ecuaciones de Euler, que ignoraban la existencia de la viscosidad, resultaba que la fuerza que sufre un obstáculo inmerso en una corriente era nula; es decir el objeto no era arrastrado por el flujo. Para D' Alembert era claro que este resultado matemático estaba en franca contradicción con sus observaciones, y que el problema debía de estar en alguna de las premisas de la teoría.

En forma consistente subrayó la primacía que el experimento debía tener sobre la teoría. Diversos argumentos de Euler (1707 – 1783) y de Lagrange (1736 – 1813), para aclarar la paradoja, no pudieron convencerlo. La formulación matemática de la teoría hacia imposible que a un fluido en movimiento, se le pidiera adherirse a la superficie de un sólido en reposo. Y como consecuencia de haber ignorado la fricción interna de los fluidos se tenía el peculiar resultado de que los fluidos no mojaban las paredes. **¡La hidrodinámica era el estudio del agua seca!**

Es muy importante mencionar que durante el periodo comprendido entre 1750 y 1850, se sentaron las bases teóricas y experimentales de la mecánica de los fluidos. Estos cien años sirvieron para resumir, ordenar y extender el conocimiento que sobre los fluidos se había acumulado durante miles de años. Desde entonces hasta la fecha, la tarea ha sido la de extraer de estos principios formulados en forma matemática, la información necesaria para poder entender y predecir el comportamiento de los fluidos. D' Alembert es también conocido por haber sido el primero que hizo ensayos sobre la fuerza de arrastre en tanques de prueba con modelos de barcos. De hecho en el año de 1777, dirigió una extensa obra de coordinación y planeación de vías fluviales, navegación y canalización en toda Francia, y en ese mismo año publicó en París, un trabajo titulado:

“Nouvelles experiences sur la resistance des fluides”.

Finalmente durante los últimos años de su vida, D' Alembert se interesó de nuevo por el estudio de *la literatura y la filosofía*. Algunos de sus mejores trabajos versaban sobre temas históricos y musicales, así como cuestiones generales referentes a la filosofía de las ciencias. En cuanto a su personalidad D' Alembert fue un hombre de carácter escéptico y empirista, por lo cual es considerado como el fundador del positivismo.

Entre algunos de los honores que recibió Jean le Rond D' Alembert por sus contribuciones a la ciencia, sobresalen: algunos reconocimientos que obtuvo en Francia, así como la elección de Presidente de la Academia de Ciencias de Berlín en 1752. De igual forma en el año de 1754, fue nombrado socio distinguido de la Academia de Ciencias de Francia, y en 1772, fue nombrado secretario perpetuo de la misma. Murió el día 29 de octubre de 1783, en París - Francia, a sus 66 años de edad.

2.12 LA ECUACIÓN DE CHÉZY

Uno de los científicos del siglo **XVIII**, considerado como pionero por sus aportaciones a esta ciencia fue **Antoine de Chézy (1718 – 1798)**, distinguido ingeniero hidráulico y civil de origen francés. Nació el día 2 de abril de 1718 en la ciudad de Chalons – sur – Marne (Francia). En particular una de sus mejores aportaciones con la que contribuyó al desarrollo de la mecánica de los fluidos fue; la primera ecuación para el flujo uniforme en canales en el año de 1769. Dicha ecuación es hoy en día muy utilizada para el dimensionamiento hidráulico en canales, siendo esta muy caracterizada por su simplicidad y eficiencia.

Ecuación de Chézy:

$$V = C \sqrt{r_H \cdot m}$$

Donde: V ; es la velocidad media del fluido en el canal

C ; es una constante que depende de la forma y material del canal

r_H ; es el radio hidráulico

m ; es la pendiente del canal.

El radio hidráulico se define de acuerdo a la siguiente expresión:

$$r_H = \frac{\text{área de flujo de la sección transversal}}{\text{perímetro mojado}}$$

Antoine de Chezy llevó a cabo sus primeros estudios de educación primaria en su ciudad natal, poco tiempo después obtuvo el grado de ingeniero civil por parte del Instituto; **École des Ponts et Chaussées**, donde se graduó con mención honorífica, y más tarde se especializó en la construcción de diversas obras de tipo civil e hidráulico, entre estas; *puentes, caminos y drenajes*. En el año de 1797 fue nombrado director del instituto École des Ponts et Chaussées, debido al apoyo brindado por parte de un grupo de amigos y de su mejor alumno *Riche de Prony (1755 – 1839)*. Es muy importante mencionar que la ecuación de Chézy fue planteada como el parámetro de semejanza, para poder predecir las características del flujo en un canal, a partir de las mediciones efectuadas en otro canal. (Semejanza de modelos).

Como resultado de estos hechos en el año de 1776, Antoine de Chézy, publicó en París, uno de sus mejores tratados sobre hidráulica, el cual tituló:

“Formule pour trouver la vitesse de l' eau conduit dan une rigole donnee”.

Dicho tratado contenía los principios fundamentales sobre el desarrollo de su ecuación, así como las aplicaciones más importantes de esta. En mecánica de fluidos, existe una ecuación de gran utilidad para calcular la constante **C**, de la ecuación de Chézy (que depende de la forma y material del canal):

$$C = \sqrt{\frac{8 \cdot g}{f_D}}$$

Otra fórmula muy útil, para calcular la constante C, es la de Bazin:

$$C = \frac{87}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{r_H}}}$$

Donde: γ ; es un coeficiente que depende de la naturaleza de las paredes del canal. En algunos otros casos, para calcular la constante C, también se suele emplear el coeficiente de Manning (véase biografía de Robert Manning).

Entre otras aportaciones con las que contribuyó Antoine de Chezy, al desarrollo de esta ciencia, no solamente destacan una amplia variedad de experimentos sobre el flujo de fluidos en canales, sino también, un excelente libro sobre **hidráulica** (publicado en tres volúmenes diferentes), y algunas otras publicaciones al respecto. No obstante, a pesar de sus notables contribuciones por el desarrollo de esta ciencia, se vio forzado a huir de Francia, durante la revolución de aquella época. Murió el día 5 de octubre de 1798, en París, a sus 80 años de edad.

2.13 JEAN CHARLES DE BORDA Y SUS APORTACIONES A LA MECÁNICA DE LOS FLUIDOS

Por esa época, otro de los científicos que también hizo contribuciones al desarrollo de esta ciencia fue **Jean Charles de Borda (1733 – 1799)**. Sobresaliente por sus estudios e investigaciones, al perfeccionar algunas máquinas hidráulicas, y famoso por sus estudios sobre: la resistencia de los fluidos. Debido a que demostró que la resistencia es proporcional al cuadrado de la velocidad de los fluidos, y al seno del ángulo de incidencia, calculó el coeficiente de contracción de los fluidos, para el caso de orificios.



Figura 2.42 Jean Charles de Borda
(1733 – 1799)

Jean Charles de Borda distinguido ingeniero militar, físico, matemático y astrónomo – marino de origen francés, nació el día 4 de mayo de 1733 en la ciudad de Dax (Francia). Miembro de una familia perteneciente a la nobleza y con tradiciones militares. Su padre fue un distinguido ingeniero militar llamado **Jean – Antoine de Borda (1695 – 1767)**, y su madre en cambio, una humilde mujer al cuidado de sus diez hijos. En los primeros años de su vida se educó en compañía de sus padres, poco tiempo después llevó a cabo sus primeros estudios de educación primaria en una institución de tipo religioso; *The College des Barnabites* (1740). En dicho colegio sobresalió como uno de los mejores alumnos de su época, puesto que destacó en la mayoría de sus asignaturas, entre estas: *filosofía, griego, latín y matemáticas*. Mas tarde llevó a cabo sus

estudios de educación universitaria, en una institución dedicada a la enseñanza de la ingeniería; *The Jesuit College at La Flèche*, donde adquirió el conocimiento y la formación de ingeniero militar, y en el año de 1748, se graduó por parte de esta institución. Posteriormente comenzó a estudiar una carrera de matemáticas en el ejército, y a la edad de veinte años presentó su primer trabajo sobre **geometría**, el cual envió al matemático Jean le Rond D' Alembert en el año de 1753. Dos años más tarde como resultado de estos hechos, fue galardonado con una comisión docente, donde dedicó la mayor parte de su tiempo a la enseñanza de las matemáticas en el *Cuerpo de Caballería en el ejército militar*. Durante su estancia como profesor en el ejército, no solo dedicó, la mayor parte de su tiempo a la enseñanza de las matemáticas, sino también, emprendió algunas otras investigaciones, en particular sobre: **el estudio de la balística**. A mediados del año de 1756, sobresalió con uno de sus mejores trabajos sobre la teoría de los proyectiles, el cual presentó ante la Academia de Ciencias de París.

En el año de 1775, tomó parte en la guerra de Independencia de Norteamérica, y luego participó en misiones navales técnicas; sus invenciones le hicieron acreedor a la entrada a la Academia de Ciencias. Es importante mencionar que el ingeniero Jean Charles de Borda es autor de numerosas invenciones hidráulicas, entre estas; **el perfeccionamiento de las ruedas hidráulicas, las bombas y la mejora de los instrumentos de navegación**. Y como resultado de estos hechos fue nombrado; *inspector de construcciones navales*.

Entre sus aportaciones más importantes sobresalen: *un gran número de estudios relacionados con la resistencia de los fluidos; pues logró demostrar que muchas de las teorías de Newton sobre la resistencia de los fluidos eran insostenibles, y mostró que la resistencia es proporcional al cuadrado de la velocidad de los fluidos, y al seno del ángulo de incidencia. También calculó el coeficiente de contracción de los fluidos en orificios*. Dichos estudios sirvieron de base para introducir el concepto de las líneas de corriente, y en honor al científico francés, existe en flujo de fluidos lo que se conoce comúnmente como: **entrada y salida de borda**.



Figura 2.43 Entrada de Borda, accesorio u orificio por donde entra o fluye un fluido.

En la figura 2.43, se ilustra una entrada de Borda o accesorio, por donde entra o fluye un fluido. Estas pérdidas de presión por fricción en los accesorios son proporcionales a la velocidad (energía cinética). Como en este caso no hay bomba, y no existen pérdidas de energía potencial en el sistema, al aplicar un balance de energía mecánica (Bernoulli), se tiene la siguiente expresión:

$$H_f = \frac{\Delta P}{\rho} = K \frac{u^2}{2 \cdot g_c}$$

Donde: K; es el coeficiente de resistencia que depende del accesorio, y se obtiene por medio de unas tablas. Dicho coeficiente de resistencia o factor (K), se utiliza para calcular cabezas cinéticas de velocidad, y se define de acuerdo a la siguiente expresión:

$$K = f_D \frac{Le}{D}$$

En el año de 1766, Jean Charles de Borda, publicó en París, uno de sus mejores tratados sobre el movimiento de los fluidos, el cual tituló:

“Mémoire sur l'écoulement des fluides par les orifices des vases”.

Dicho tratado contenía la mayor parte de sus investigaciones en relación con; *los principios básicos de la conservación de la energía, para el caso de flujo de fluidos a través de líneas de corriente y de descargas; condujo varias pruebas sobre la resistencia de inmersión de cuerpos fluidos a través de tuberías, y formuló la pérdida de carga por expansión brusca en un conducto confinado; esas investigaciones de pérdida de carga, fueron demostradas en alargamientos bruscos (líneas de flujo), para el régimen turbulento.*

Algunos otros estudios del ingeniero Jean Charles de Borda versaban sobre: la medida del arco del meridiano terrestre, los cuales efectuó en compañía de **Méchain (1744 – 1804) y Delambre (1749 – 1822)**, y sirvieron para establecer el sistema métrico en el año de 1793. En la siguiente figura, se ilustra el instrumento que utilizó el ingeniero Jean Charles de Borda, durante la época de la Revolución Francesa, el cual sirvió para efectuar la medida del arco del meridiano terrestre, como parte de su proyecto para introducir el sistema métrico decimal; **el círculo rotatorio de Borda.**

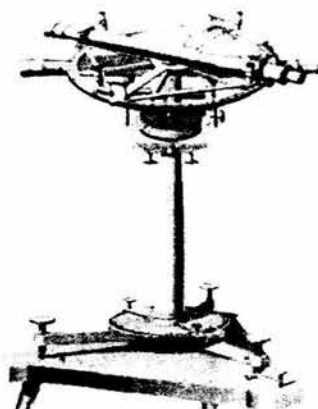


Figura 2.44 Circulo rotatorio del Ingeniero Jean Charles de Borda

Dicho instrumento de medición, fue propuesto por Borda, en el año de 1785, y fue desarrollado a partir del diseño de los instrumentos de navegación, para su uso en los barcos. El instrumento estaba conformado por dos telescopios pequeños, cada uno fijo a un par de anillos, los cuales podían rotar independientemente contra una escala. En el campo de las matemáticas, Jean Charles de Borda, hizo buen uso del cálculo diferencial y de los métodos experimentales para unificar diversas áreas de la física; él fue el primer científico que utilizó el péndulo para medir la fuerza de la gravedad. También desarrolló una serie de tablas trigonométricas.

Entre algunos de los honores que recibió Jean Charles de Borda por sus contribuciones a la ciencia, sobresalen: algunos reconocimientos que obtuvo en el ejército militar, así como la elección de miembro de la Academia de Ciencias de París en el año de 1756. De igual forma en 1790, fue nombrado Presidente de la Comisión de Pesos y Medidas en París. Murió el día 20 de febrero de 1799, en París – Francia, a sus 66 años de edad.

2.14 EL TUBO DE VENTURI

Giovanni Battista Venturi (1746 – 1822), distinguido físico y sacerdote de origen italiano, nació el día 24 de febrero de 1746 en la ciudad de Bibbiano cerca del municipio de Reggio Emilia (Italia). En los primeros años de su vida se educó en compañía de sus padres, poco tiempo después empezó a trabajar como *asistente de ingeniero y auditor*. Más tarde llegó a ser profesor de la escuela de ingenieros militares en Módena, donde impartió clases de *geometría y filosofía*. Posteriormente llegó a ser profesor de la universidad de Pavía, en donde impartió clases de física experimental, y en el año de 1797, publicó en París, uno de sus mejores trabajos, el cual tituló:

“Recherches expérimentales sur le principe de communication latérale dans fluides”.

Dicho trabajo contenía los principios fundamentales sobre la descripción y el funcionamiento de un importante dispositivo hidráulico comúnmente conocido como **el tubo de Venturi**. En el área de los fluidos, Giovanni Battista Venturi, consiguió importantes resultados, sobre el estudio del movimiento de los líquidos, tal es el caso de los tubos divergentes en conductos (la tobera que ahora lleva su nombre). Así mismo efectuó una extensa variedad de pruebas efectuadas, sobre varias formas de boquillas, en particular **contracciones y expansiones cónicas**.

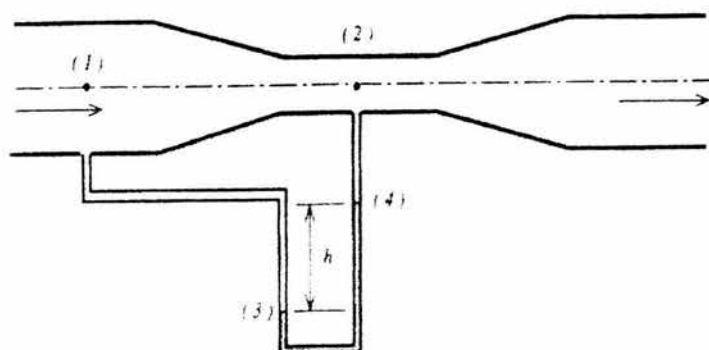


Figura 2.45 Tubo de Venturi

En la figura 2.45, se ilustra un medidor de Venturi, el cual fue diseñado para estudiar los efectos de la caída de presión, al igual que la velocidad de salida de los fluidos. Dicho dispositivo consiste de un tubo cilíndrico y un estrangulamiento, el cual contiene dos manómetros; uno antes de la garganta y el otro sobre la garganta. El fluido que pasa por el tubo ve reducir su presión y aumentar su velocidad, la diferencia de presión en el manómetro, relaciona los gastos; *volumétrico y másico*. Existen numerosas aplicaciones tecnológicas del tubo de Venturi, por ejemplo; en el caso del carburador de los automóviles, en las trampas de vacío, en aparatos para el tratamiento de agua salada, hasta ozonadores y alimentadores químicos. En el año de **1881**, el físico norteamericano **Clemens Herschel (1842 – 1930)**, construyó este dispositivo de medición (tubo de Venturi), tomando como base los trabajos de *Giovanni Battista Venturi*. Sin embargo, dicho instrumento de medición, lleva ese nombre en honor del científico italiano, ya que fue el primero en haber experimentado con tubos divergentes. La ecuación que permite obtener la velocidad en el tubo de Venturi, es la siguiente:

$$u = C_v \sqrt{\frac{2g_c \cdot \Delta P / \rho}{1 - (D_1 / D_2)^4}}$$

Donde: u ; es la velocidad en la garganta del venturi

C_v ; es el coeficiente de la velocidad

g_c ; es el factor de conversión

ΔP ; es la caída de presión

ρ ; es la densidad del fluido

D₁ ; es el diámetro de la garganta del venturi

D₂ ; es el diámetro de la tubería.



Figura 2.46 Giovanni Battista Venturi
(1746 – 1822).

Algunos otros estudios de Venturi concernían sobre: óptica, en particular sobre la teoría de los colores, así mismo realizó estudios sobre acústica, en este campo de la ciencia, estudió los sonidos perceptibles por el oído humano. Murió el día 23 de noviembre de 1822, en la ciudad de Reggio Emilia (Italia), a sus 76 años de edad.

CAPÍTULO 3
DEL SIGLO XIX

CAPITULO 3. DEL SIGLO XIX

3.1 LAS ECUACIONES DE NAVIER - STOKES

Desde el punto de vista experimental, el siglo XIX, se inició con una sólida tradición. Se contaba con una gran variedad de técnicas y métodos confiables y, en consecuencia, con resultados razonablemente precisos, en especial sobre la resistencia de obstáculos a un flujo. **La hidráulica había avanzado en forma casi independiente de la hidrodinámica teórica;** y en cierto sentido, caminaban por veredas distintas, aunque paralelas, compartiendo problemas y perspectivas pero difiriendo en métodos, prioridades y lenguaje. El consenso en torno a lo equivocado que era el ignorar los efectos de la viscosidad se había alcanzado en la primera década del siglo XIX. En el año de 1821, se presentó ante la Academia de Ciencias, de París, un trabajo de; **Claude Louis Marie Henri Navier (1785 – 1836)**, ingeniero de formación y vocación.



Figura 3.1 Claude Louis Marie Henri Navier (1785 – 1836)

Claude Louis Marie Henri Navier distinguido ingeniero y matemático de origen francés, nació el día 10 de febrero de 1785 en la ciudad de Dijon (Francia). Fue considerado como un erudito de la ciencia de la ingeniería por sus destacados trabajos en física y en matemáticas. En los primeros años de su

vida se educó en compañía de sus padres, poco tiempo después llevo a cabo sus estudios de educación universitaria en el Instituto; **École Polytechnique**, (1802), donde tuvo por maestro a **Fourier (1768 – 1830)**, quien le enseñó a hacer análisis de ingeniería, y en el año de 1831, llegó a ser profesor de esta institución, donde impartió clases de *mecánica y análisis*. Mas tarde ingresó al Instituto **École des Ponts et Chaussées**, (1804); de cuya Academia fue nombrado profesor en el año de 1819, ocupando dicho puesto hasta su muerte. Especialista en el diseño de puentes, fue él primero en haber construido un puente colgante a partir de un proyecto y de un cálculo (previamente las construcciones se hacían sobre bases empíricas). Sin embargo, Navier es recordado hoy en día, no por el diseño de sus puentes sino por la ecuación de dinámica de fluidos llamada de **Navier – Stokes**. Trabajó en matemáticas aplicadas en tópicos tales como ingeniería, elasticidad y mecánica de fluidos; además, hizo contribuciones a las series de Fourier mismas que aplicó a la resolución de problemas físicos. **Entre sus aportaciones más importantes, para el desarrollo de la mecánica de los fluidos, sobresalen: los estudios e investigaciones que efectuó sobre las ecuaciones de movimiento para incluir las fuerzas de tipo molecular en los fluidos.**

Como ya se dijo en el año de 1821, presentó un trabajo ante la Academia de Ciencias de París, en el que se deducían las ecuaciones fundamentales de la elasticidad (que hoy en día llevan su nombre), para el estudio de los flujos incompresibles, así como para describir el equilibrio y las vibraciones de un sólido. Estas ecuaciones resultaban de un análisis puramente matemático en el que los átomos, entonces entes hipotéticos, se imaginaban como partículas que interactuaban por medio de resortes. **Ecuaciones de Navier – Stokes:**

$$\frac{du_x}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 u_x$$

$$\frac{du_y}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 u_y$$

$$\frac{du_z}{dt} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 u_z$$

Donde: ρ ; es la densidad del fluido, p ; es la presión del fluido, ν ; es la viscosidad cinemática del fluido, u ; es la velocidad del fluido (en cualquier dirección x , y o z), y ∇^2 ; es el operador Laplace, cuya expresión característica es la siguiente:

$$\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$$

Es muy importante mencionar que las ecuaciones de *Navier - Stokes*, se reducen a las ecuaciones de Euler, cuando el fluido es ideal, y cuando el valor de la viscosidad cinemática se reduce a cero; además, dichas ecuaciones se aplican sólo para el caso de los llamados **fluidos newtonianos**. En 1827, Navier presentó una memoria en la que guiado por una analogía formal con la teoría de la elasticidad, deducía por primera vez las ecuaciones que incorporaban la viscosidad en la dinámica de un fluido. Como caso especial, el fluido ideal ó invícido (que no presenta fricción interna). Dicha memoria se titulaba:

“Mémoire sur les lois du mouvement des fluides”.

Cabe mencionar que en este trabajo, Navier derivó su ecuación sin comprender completamente la situación física que estaba modelando. No sabía en aquel tiempo acerca del esfuerzo cortante de los fluidos y por ello se basó en una modificación de la ecuación de Euler para tomar en cuenta las fuerzas intermoleculares de los fluidos; en el caso general las ecuaciones eran de naturaleza esencialmente distinta. Desafortunadamente, la deficiente interpretación que dio a sus resultados, al resolver ciertos casos, le impidió explorar su notable contribución. Aún así, el agua y todos los fluidos, ***¡habían empezado a mojar!***. Las ideas de Navier sobre la atracción y repulsión entre las moléculas, como origen de la viscosidad, fueron seguidas y ampliadas por dos excelentes matemáticos de la época: *Simeon Denis Poisson* (1781 – 1840) y *Augustin Louis de Cauchy* (1789 – 1857). El carácter especulativo de las hipótesis “**microscópicas**”, que usaron le da a sus trabajos en este particular un interés sólo histórico.

Siguiendo una argumentación totalmente distinta, y en términos de conceptos puramente macroscópicos, y evitando todo lo relativo a la constitución última de un fluido, el científico francés Jean Claude Barré de Saint Venant (1797 – 1886), dedujo las mismas ecuaciones de Navier. Su trabajo publicado en 1843, contiene una deducción semejante a la que hoy en día se

sigue, para obtener las ecuaciones. La fama de Saint Venant provino de sus múltiples trabajos en elasticidad, ya que en hidrodinámica su nombre nunca fue asociado ni a las ecuaciones que obtuvo, ni a los diversos resultados que posteriormente fueron encontrados por otros investigadores, particularmente de Inglaterra.

Entre algunos de los honores que recibió Claude Louis Marie Henri Navier por sus contribuciones a la ciencia, sobresalen: algunos reconocimientos que obtuvo en Francia, por su brillante carrera en el área de la enseñanza de las matemáticas y la ingeniería, así como la elección de miembro de la Academia de Ciencias de París en el año de 1824. También ocupó el puesto de consultor por parte del gobierno en 1831, para aconsejar sobre como la ciencia y la tecnología se podían utilizar para mejorar el país. Murió el día 21 de agosto de 1836, en París - Francia, a sus 51 años de edad.

Entre otros estudios e investigaciones, sobresalen los trabajos del matemático; **George Gabriel Stokes (1819 – 1903)**. En el área de los fluidos, destacan algunos de sus mejores trabajos sobre la solución analítica que obtuvo en comparación a varias relaciones de flujo, que varían desde la mecánica de ondas hasta la resistencia viscosa, en particular sobre el asentamiento de esferas.



Figura 3.2 George Gabriel Stokes
(1819 – 1903).

George Gabriel Stokes distinguido matemático y físico de origen inglés, nació el día 13 de agosto de 1819, en la ciudad de Skreen cerca del municipio de Sligo (Irlanda). En los primeros años de su vida se educó en compañía de sus padres, poco tiempo después llevó a cabo sus primeros estudios de educación primaria en su ciudad natal. En el año de 1841, obtuvo el grado de matemático por parte del Instituto; **Premboke College**, donde adquirió ciertos conocimientos y habilidades sobre el área de; matemáticas y física. En el área de los fluidos, estudió numerosos temas sobre hidrodinámica, y en el año de 1843, publicó un trabajo sobre el movimiento de los fluidos incompresibles, el cual tituló: ***“On the steady motion of incompressible fluids”***.

Entre sus trabajos más importantes, en muy diversos campos de las matemáticas; y de la física teórica y experimental, destacan los que versan principalmente sobre: *la dinámica de los fluidos viscosos. En la parte que concierne a los fundamentos de esta última, Stokes llevó a cabo una elegante deducción de las ecuaciones que primero obtuviera Navier, en una memoria presentada ante la Real Sociedad en el año de 1845.* Su razonamiento, análogo al de Saint Venant, fue totalmente fenomenológico, eludiendo especulaciones en torno a la constitución microscópica de los fluidos. En la memoria que él presentó, perfecciona las ecuaciones básicas para los fluidos viscosos e incompresibles, postulando como principios generales la conservación de la masa y el momento lineal (la segunda ley de Newton), como lo hicieron antes Bernoulli y Euler, lleva a cabo un cuidadoso análisis de las fuerzas que puede experimentar una pequeña parte de un fluido. Fue importante la separación que hizo entre las fuerzas que dependen de la masa de un fluido en consideración, como el peso (atracción gravitacional), y las que dependen de la superficie de la muestra, que son las responsables de la fricción.

Stokes construyó una expresión para estas últimas que era la generalización de los estudios que había efectuado Newton al respecto, ya casi olvidados con el tiempo. El resultado clave fue encontrar que la fuerza de fricción de una parte de fluido sobre otra depende de la velocidad con la que se mueve una respecto de la otra; en términos más técnicos, se diría que la fuerza de fricción, por unidad de área, depende linealmente del gradiente de la velocidad (es decir, de la forma en que varía la velocidad de un punto a otro); y qué tan estrecha es esta relación, lo que determina un factor constante llamado **el coeficiente de viscosidad**. A diferencia de Navier y de Saint Venant, Stokes analizó y resolvió las ecuaciones para algunos casos, obteniendo los primeros resultados que podrían ser contrapunteados exitosamente con los experimentos. ***Las ecuaciones ahora llevan el nombre de Navier – Stokes.***

Con el establecimiento de las ecuaciones básicas, el éxito de las primeras e importantes aplicaciones de ellas, el gran cúmulo de precisas observaciones y el desarrollo de muy diversos métodos de investigación experimental y analítica, la ciencia de los fluidos en aquel tiempo tomaba la forma que tiene tal y como hoy la conocemos. Los cimientos del trabajo de las generaciones futuras estaban completos. Apareció entonces un problema que hasta la fecha no ha sido resuelto satisfactoriamente: las matemáticas necesarias para resolver las recién descubiertas ecuaciones (no lineales). Así, al comenzar la segunda parte del siglo XIX, los interesados en la hidrodinámica se encontraron con un problema claramente planteado pero con insuficientes herramientas para resolverlo. No es de sorprender que el mismo Stokes iniciara uno de los enfoques para abordar el problema.

“Si no puedes agarrar al toro por los cuernos, ¡corre!”, dice un adagio azteca, y así lo hizo. Argumentando cuidadosamente, simplificó las ecuaciones de manera que pudiera domesticarlas y sacarles provecho. Los resultados que obtuvo por la aproximación tuvieron tal éxito que hoy en día se siguen explotando estas mismas ecuaciones que, desde luego, también llevan su nombre; *Ecuaciones de Navier – Stokes*. Su análisis del movimiento de una esfera en un líquido sigue siendo uno de los resultados clásicos de la mecánica de los fluidos; la expresión que relaciona a la fuerza que arrastra a una esfera con el producto de la velocidad de la corriente, el radio de la esfera y la viscosidad del fluido, se conoce como **la ley de Stokes**:

$$u_t = \frac{Dp^2 \cdot (\rho_p - \rho) \cdot g}{18 \cdot \mu}$$

Donde: u_T ; es la velocidad terminal

D_p ; es el diámetro de la partícula

ρ_p ; es la densidad relativa de la partícula

ρ ; es la densidad del fluido

g ; es la fuerza de gravedad

μ ; es la viscosidad del fluido.

La expresión anterior, permite calcular el movimiento de pequeñas esferas en el seno de líquidos con viscosidad elevada. Por ejemplo, si una partícula cae dentro de un fluido su velocidad aumenta conforme cae, y continúa aumentando hasta que las fuerzas gravitacionales y de resistencia se igualan. Cuando se alcanza este punto la velocidad de la partícula permanece constante durante el resto de la caída. Esta última velocidad constante recibe el nombre de; *velocidad terminal*, y se calcula con la ley de Stokes para el flujo laminar. Dicha ley, sólo se aplica, si; ($Re < 0.1$). Si no es así, la ecuación anterior se debe modificar. La mayor parte de sus trabajos de Stokes, concernían sobre el movimiento pendular de los fluidos, lo que lo llevó a publicar un artículo fundamental sobre hidrodinámica en el año de 1851, el cual tituló:

“On the Theories of the Internal Friction of Fluids in Motion, and of the Equilibrium and Motion of Elastic Solids”.

En dicho trabajo, Stokes describe su ley sobre la viscosidad, al igual que la velocidad a la que cae una esfera a través de un fluido viscoso. Es importante mencionar que una de las unidades de viscosidad cinemática en el sistema; **C. G. S**, lleva su nombre (el Stokes), y en honor al científico inglés, a dicha relación se le conoce con ese nombre:

$$1St = 0.0001 \frac{m^2}{s}$$

En mecánica de fluidos, existe también una fórmula que relaciona y describe, la resistencia y el rozamiento sobre el movimiento de esferas en medios viscosos; **fórmula de Stokes**. Una esfera que se mueve en un líquido viscoso de viscosidad μ , a la velocidad v , y que tiene un radio r , tiene una resistencia dada por:

$$W = 6\pi \cdot \mu \cdot v \cdot r$$

Un problema representativo para el caso de los fluidos fue (y sigue siendo), el de establecer el flujo en tuberías. Por evidentes razones prácticas había sido objeto de innumerables estudios teóricos y experimentales. Hasta que no se incorporó el efecto de la viscosidad, la teoría correspondiente se había reducido a ejercicios pintorescos en matemáticas “no aplicadas”. Experimentalmente, fue el siglo **XIX**, el que vio los primeros resultados correctos sobre el flujo en un tubo, lo que no deja de llamar la atención por el uso de los acueductos, fuentes, drenajes y tuberías que había anteriormente.

Algunos otros estudios de Stokes versaban sobre: la teoría de la luz ondulatoria, en la cual relaciona su ley sobre la refrangibilidad variable de la luz. También realizó algunos otros trabajos sobre análisis (teorema de la integral de Stokes); sobre todo, en la aplicación de esta a campos eléctricos e hidrodinámicos, tales como: **absorción, espectros, luminiscencia y éter.**

Con los trabajos del ingeniero Claude Louis Marie Henri Navier (1827), y del matemático George Gabriel Stokes (1845), en forma independiente, se generalizaron las ecuaciones de movimiento (ecuaciones de Navier – Stokes), con la inclusión del concepto de viscosidad, y con ecuaciones que se aplican a una determinada clase de fluidos, llamados *newtonianos*.

Entre algunos de los honores que recibió Sir George Gabriel Stokes por sus contribuciones a la ciencia, sobresalen: algunos reconocimientos que obtuvo en Cambridge, por su brillante carrera en el área de la enseñanza de las matemáticas Lucasianas (1849), y de la física teórica y experimental, así como la elección de miembro de distinguidas sociedades, entre estas: la Real Sociedad de Londres (1851), en donde obtuvo la medalla Rumford, en el año de 1852, por parte de esta sociedad. De igual forma, en el año de 1854, fue nombrado secretario de la Real Sociedad de Londres, y en 1885, fue nombrado Presidente de esta sociedad; puesto que ocupó hasta el año de 1890. También ocupó el cargo de Presidente en el Instituto Victoria, desde 1886 hasta el año de su retiro. Murió el día 1 de febrero de 1903, en la ciudad de Cambridge (Inglaterra), a sus 83 años de edad.

3.2 LAY LEY DE HAGEN – POISEUILLE

En la primera mitad del siglo XIX, aparecen los trabajos del ingeniero; **Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen (1797 – 1884)**. En este campo de la ciencia se le acreditan, los primeros estudios e investigaciones, sobre la resistencia y la transición, entre *flujo laminar* y *flujo turbulento*. También se le acredita la divulgación científica de la ecuación de Chezy, en el año de 1876.



Figura 3.3 Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen (1797 – 1884).

Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen distinguido ingeniero hidráulico y civil de origen alemán, nació el día 3 de marzo de 1797, en la ciudad de Königsberg (Alemania). A la edad de 19 años decidió estudiar matemáticas y astronomía, posteriormente comenzó a trabajar como ingeniero y administrador (1818), en el diseño y construcción de diversas obras de tipo civil e hidráulico, entre estas; *puertos y edificios*. Poco tiempo después, realizó diversos estudios y cálculos para la construcción de un edificio que inició en el año de 1822. Como resultado de varios viajes que efectuó alrededor de Europa, estudió una gran variedad de estructuras de tipo hidráulico, para el diseño y construcción de puertos. Uno de sus mejores proyectos fue la construcción de una base naval para la ciudad de; *Wilhelmshaven*, y su mayor obra fue publicada en varios volúmenes sobre ingeniería hidráulica; ***“Handbuch der Wasserbaukunst”***. Dicha obra fue publicada en Berlín, en 1841. En el año de 1826, fue nombrado supervisor de

construcción de puertos y edificios. Años mas tarde, durante el periodo comprendido entre 1834 y 1849, dedicó parte de su vida como profesor de la enseñanza de la ingeniería, en la Academia de la construcción y la artillería, así como en la escuela de ingeniería hidráulica de Berlín. Para el año de **1839**, llevó a cabo una serie de medidas meticulosas sobre: el flujo de agua en tubos con diámetro pequeño, utilizando la temperatura del agua, en vez de la viscosidad como uno de los parámetros, y en ese mismo publicó en Berlín un trabajo, el cual tituló:

“Ueber die Bewegung des Wassers in engen cylindrischen Rohren”.

Pocos años después, el médico francés; Jean Poiseuille, repitió de forma independiente los mismos experimentos, pero usando tubos capilares, para simular los vasos sanguíneos del cuerpo humano, y utilizando como fluidos; *mercurio, aceite y agua*. Es muy importante mencionar que excepto en Alemania, el estudio ó el fenómeno atribuido a estos dos científicos, es conocido como: flujo de Poiseuille, aunque si bien, ninguno de los dos realmente comprendió las matemáticas del fenómeno en estudio. Sin embargo, Hagen había aclarado en **1854**, las características que presentaba el tipo de flujo en estudio, es decir que el flujo no era siempre de característica laminar porque algunas veces era claro, y otras veces escarchado; de forma semejante como el aserrín suspendido en el agua, movido algunas veces en líneas rectas, y otras veces muy irregular. Por esa misma época, publicó otro de sus mejores trabajos, el cual tituló:

“Ueber den Einfluss der Temperatur auf die Bewegung des Wassers in Rohren”.

Entre algunos de los honores que recibió Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen por sus contribuciones a la ciencia, sobresalen: algunos reconocimientos que obtuvo en Berlín, por sus brillante carrera en el área de la enseñanza de las matemáticas y la ingeniería, así como la elección de miembro de la Academia de Ciencias de Berlín en el año de 1854. Murió el día 3 de febrero de 1884, en Berlín (Alemania), a sus 87 años de edad.

Entre otros estudios e investigaciones, sobresalen los trabajos del médico; **Jean Louis Marie Poiseuille (1799 – 1869)**. En el área de los fluidos se le acreditan, un gran número de experimentos (pruebas meticulosas), sobre: la resistencia que presentan los fluidos a través de tubos capilares; formuló las leyes de la circulación laminar para los fluidos viscosos (1844).



Figura 3.4 Jean Louis Marie Poiseuille
(1799 – 1869).

Jean Louis Marie Poiseuille distinguido médico y físico de origen francés, nació el día 22 de abril de 1799 en París (Francia). En los primeros años de su vida se educó en compañía de sus padres, poco tiempo después llevo a cabo sus primeros estudios de educación primaria en su ciudad natal. Mas tarde ingresó al instituto **École Polytechnique**, en donde adquirió conocimientos y habilidades sobre las áreas de; *la medicina, física y matemáticas*. En el año de 1819, obtuvo el grado de médico, por parte de esta institución, y en ese mismo año publicó en París, uno de sus primeros trabajos sobre *la presión arterial y la circulación de la sangre*. Pocos años después, sobresalió con la invención de un aparato ó dispositivo, mejor conocido como: **el hemo – dinamómetro** (1827), el cual fue de gran ayuda en aquel entonces, para el desarrollo de sus primeras investigaciones, sobre la fisiología del cuerpo humano. Para el año de 1828, obtuvo el grado de doctor en ciencia con una disertación titulada:

“Recherches sur la force du coeur aortique”.

Donde describe un gran número de experimentos, sobre el desarrollo de sus aparatos, que le permitieron estudiar los efectos de la presión en la sangre durante varias fases de la respiración, así como la variación del volumen de sangre que pasa a través de las arterias, bajo los efectos de los latidos del corazón.

Más tarde se interesó por algunos los factores que influían en la fisiología del aparato cardiovascular, al igual que en la circulación de la sangre y para caracterizar al flujo sanguíneo, llevó a cabo una serie de experimentos que le permitieron en **1844**, formular las leyes de la circulación a flujo laminar, y publicar la ley que lleva su nombre. En ese mismo año, publicó en París, uno de sus mejores trabajos, el cual tituló:

“Recherches experimentales sur le mouvement des liquides dans les tubes de très petits diamètres”.

En dicho trabajo, publicó los primeros experimentos que trataban sobre el rozamiento de los fluidos a baja velocidad en tuberías muy delgadas (tubos capilares), logrando así determinar la forma del flujo, la resistencia de éste y la descarga. Mediante la expresión matemática que Poiseuille formuló se describe el flujo laminar de los fluidos, en tubos circulares, y debido a las experiencias que anteriormente había llevado a cabo el científico alemán Ludwig Hagen (1707 – 1884), a dicha relación ó expresión matemática, se le conoce comúnmente como: *la ley de Hagen – Poiseuille; esa ley se puede emplear, para calcular viscosidades, siempre que el número de Reynolds, sea menor de 2100*. De esta forma, el caudal ó flujo volumétrico **Q**, que circula en el interior de un tubo cada segundo, depende de la carga (la diferencia de presiones por unidad de longitud), así como del diámetro del tubo (el radio de la sección transversal a la cuarta potencia). **Ley de Hagen – Poiseuille:**

$$Q = \frac{\pi \cdot \Delta P \cdot R^4}{8 \cdot \mu \cdot L}$$

Donde: **Q**; es el caudal ó gasto volumétrico

ΔP ; es la diferencia de presiones por unidad de longitud

R; es el radio de la sección transversal del tubo ó capilar

μ ; es la viscosidad del fluido

L; es la longitud del tubo ó capilar.

Lo interesante de esta investigación, es que los resultados no son aplicables al cuerpo humano, ya que la sangre no es un fluido newtoniano, y las venas y las arterias no son tubos rígidos; pero en cambio si se aplica a la ingeniería; **fenómenos de transporte y flujo de fluidos**.

Veinte años más tarde se desarrolló el primer análisis teórico que explicaba las observaciones de Poiseuille. Franz Neumann (1798 – 1895) y Eduard Hagenbach (1833 – 1910), en forma independiente, obtuvieron las expresiones para la forma (parabólica), del flujo y la descarga, que se ajustaban bien a los datos conocidos; Hagenbach, al citar sólo a Poiseuille, sin mencionar a Hagen, inició la discriminación de su compatriota. Dichas investigaciones, fueron de gran ayuda para describir los perfiles de velocidad, entre el régimen laminar y turbulento, ya que Reynolds, no los estableció, ni los describió.

En las siguientes figuras, se puede apreciar como es la velocidad de flujo volumétrico, en el capilar para el régimen; **laminar y turbulento**.



Figura 3.5 Flujo laminar a baja velocidad en el capilar



Figura 3.6 Flujo turbulento a alta velocidad en el capilar.

Es muy importante mencionar que mediante las investigaciones que Poiseuille efectuó, fue como se desarrolló un mejor método para medir la presión arterial. Se cree que fue Poiseuille el primero en haber utilizado el manómetro de mercurio para medir la presión arterial. Cabe mencionar que una de las unidades de viscosidad en el sistema; **C. G. S**, lleva su nombre (el Poise), y en honor al científico francés, a dicha relación se le conoce con ese nombre:

$$1 \text{ Poise} = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm} \cdot \text{s}}$$

Entre algunos de los honores que recibió Jean Louis Marie Poiseuille por sus contribuciones a la ciencia, sobresalen: algunos reconocimientos que obtuvo en París, por su brillante carrera en el área de la enseñanza de la medicina y la fisiología, así como la elección de socio distinguido de la Academia de Medicina de París en el año de 1842. También fue nombrado inspector del Instituto *École Polytechnique*. Murió el día 26 de diciembre de 1869, en París - Francia, a sus 70 años de edad.

3.3 LA ECUACIÓN DE DARCY – WEISBACH

Casi a mediados del siglo XIX, destacan los estudios e investigaciones de; **Henri Philibert Gaspard Darcy (1803 – 1858)**, y de **Julius Ludwig Weisbach (1806 – 1871)**. El primero de ellos, realizó un gran número de experimentos, sobre la resistencia que presentan los fluidos, tal es el caso de; la filtración y el flujo de agua en tuberías (caídas de presión y resistencia de tubos), así mismo contribuyó al desarrollo de la ecuación de **Darcy – Weisbach**, que relaciona las pérdidas por fricción en tuberías. También realizó grandes aportaciones al flujo en canales abiertos.



Figura 3.7 Henri Philibert Gaspard Darcy (1803 – 1858).

Henri Philibert Gaspard Darcy distinguido ingeniero hidráulico y civil de origen francés, nació el día 10 de junio de 1803 en la ciudad de Dijón (Francia). En los primeros años de su vida se educó en compañía de sus padres, poco tiempo después quedó huérfano de padre (1817), por lo que su madre; Agathe Serdet hizo todo lo posible de modo que su hijo Henri Darcy y su hermano tuvieran la mejor educación. En el año de 1821, Henri Darcy decide ingresar al instituto **École Polytechnique**, gracias al apoyo financiero ó económico que le otorgo el municipio de su ciudad. En dicha institución destacó en la mayoría de sus asignaturas, con excepción del área de la química, puesto que no era muy entusiasta por el aprendizaje de esta ciencia, y debido a esta causa, se vio en la necesidad de interrumpir sus estudios, en esta institución.

Mas tarde ingresó a la escuela de ingeniería de París, mejor conocida como: ***École des Ponts et Chaussées***, (1823), donde adquirió el conocimiento y la formación como ingeniero especialista en el diseño de *puentes, caminos y drenajes*; además, en dicha institución sobresalió como uno de los mejores alumnos de su época. Para el año de 1826, obtiene el grado de ingeniero civil por parte de esta institución, y poco tiempo después, lleva cabo uno de sus primeros trabajos en la ciudad de Dijon, ya que se le confía un proyecto de tipo hidráulico. Durante el periodo comprendido entre 1838 y 1844, fue encargado de la administración y mando de otro proyecto hidráulico, sobre el transporte y el suministro del agua a la ciudad de Dijon, y como resultado de estos hechos, fue nombrado en el año de 1840, Jefe de Ingeniero, debido a la mejora de muchos proyectos en aquella época. Durante la revolución de 1848, trabajó en el canal de la Baya, y en el año de 1850, es designado como Director e Ingeniero en el servicio y suministro del agua a la ciudad de Pavés en París. En la ciudad de Bruselas, trabajó como consultor, en el diseño y construcción de un sistema de transporte de agua, así mismo participó en el diseño y construcción de diversas obras de tipo civil en aquella época. En el año de **1856**, Henri Darcy publicó una obra titulada:

“Les fontaines publiques de la ville de Dijon”.

Dicha publicación fue de gran ayuda en aquel entonces, puesto que sirvió para el desarrollo de su ley, sobre el flujo de agua en medios porosos, y en ese mismo año, fue encargado del estudio de la red de abastecimiento de agua a la ciudad de Dijon. Parece que también se debían diseñar filtros de arena para purificar el agua, así que se interesó por algunos de los factores que influían en el flujo del agua a través de materiales arenosos, y presentó el resultado de estos trabajos como un apéndice de su informe acerca de la red de distribución. Fue realmente debido a estos estudios e investigaciones como el ingeniero; Henri Darcy, estableció su ley para el flujo en medios porosos, y con los resultados de este proyecto se establecieron las bases para todos los estudios físico - matemáticos, posteriores sobre el flujo de agua subterránea. Es muy importante mencionar que su ley, puso los cimientos para varios campos de estudio que incluyen; *la hidrología del agua subterránea, la física del suelo y la ingeniería petrolera*. Para el año de **1857**, Henry Darcy publicó una de sus mejores investigaciones, referente al movimiento de aguas subterráneas:

“Recherches expérimentales relatives au mouvement de l' eau dans les tuyaux”.

Dicha investigación sirvió de base para el desarrollo de la ecuación de **Darcy – Weisbach**, la que es muy útil para obtener las pérdidas por fricción en tuberías. Algunas otras aportaciones con las que contribuyó Henri Darcy, para el desarrollo de esta ciencia fueron: la invención del tubo de pitot moderno, así como el descubrimiento de las leyes de la filtración. También es considerado como uno de los primeros investigadores que sospechó la existencia de la capa de separación en flujo de fluidos (capa límite). Entre otras aportaciones también se le acredita un gran número de estudios sobre: el flujo en canales abiertos efectuados por Henri Bazin (1829 – 1917). Henri Philibert Gaspard Darcy, recibió en vida, muchos honores por sus contribuciones a la ciencia, pero en particular uno de los mejores honores que recibió fue el nombramiento de socio distinguido de la Academia de Ciencias de París en compañía de Augustin Louis de Cauchy (1789 – 1857), en el año de 1856. Murió el día 2 de enero de 1858, en la ciudad de Dijon Francia, a sus 55 años de edad, a consecuencia de pulmonía. Su funeral en Dijon fue de gran importancia, ya que fue recordado en Francia, por el máximo jefe de estado.

Entre otros estudios e investigaciones, sobresalen los trabajos del ingeniero; **Julius Ludwig Weisbach (1806 – 1871)**, un nativo de la ciudad de Saxony, quién propuso en el año de **1845**, la ecuación que ahora nosotros utilizamos, para determinar las pérdidas por fricción en tuberías.



Figura 3.8 Julius Ludwig Weisbach
(1806 – 1871).

Julius Ludwig Weisbach distinguido ingeniero industrial y matemático de origen alemán, fue considerado también como un erudito de la ciencia de la ingeniería por sus destacados trabajos en diversas áreas de las matemáticas y de la física teórica y experimental. Nació el día 10 de agosto de 1806, en la ciudad de Mittelschmiedeberg cerca del municipio de Annaberg (Alemania). En los primeros años de su vida se educó en compañía de sus padres, poco tiempo después llevó a cabo sus primeros estudios en el instituto **Lyceum**, cerca de su ciudad natal. Después de haber terminado dichos estudios en el año de 1822, decidió continuar estudiando. Sin embargo, sus padres no podían apoyarlo más, y por tal razón se vio en la necesidad de trabajar y estudiar al mismo tiempo. En el año de 1827, Weisbach se mudó a la ciudad de Göttingen, donde solo vivió dos años. Mas tarde se dirigió a la universidad de Viena, donde adquirió el conocimiento y la formación como ingeniero industrial, destacando en muy diversos temas sobre: matemáticas, física y mecánica.

A partir del año de 1831, se dedicó a la enseñanza de las matemáticas en el Gimnasio de Freiberg, y a partir del año de 1822, en el Instituto *Bergakademie*. En ese mismo año, contrajo matrimonio con Marie Winkler, con la cual tuvo un hijo quién llegó a ser profesor de mineralogía en el Instituto *Bergakademie*. En el año de 1836, Julius Weisbach contaba ya con una amplia experiencia, sobre varios temas relacionados con matemáticas, y en ese mismo año, fue nombrado y reconocido como uno de los mejores catedráticos de la época, por su amplio criterio y conocimiento sobre estos temas. También destacó como uno de los mejores catedráticos de la época, sobre el diseño de maquinaria de mina, al igual que la supervisión.

En el año de **1839**, Weisbach se interesó por varios temas relacionados con la hidráulica, y algunos de sus mejores trabajos serían proyectados en esta área. El gran interés que tuvo este hombre, relacionado con estos temas, se debió a la visita Industrial que efectuó en París, a finales de 1839. Entre las aportaciones más importantes de Julius Weisbach, para el desarrollo de la mecánica de los fluidos, sobresalen: *la incorporación a la hidráulica de algunos tratados de ingeniería mecánica como resultado de utilizar experimentos de tipo original. También se le acreditan un gran número de estudios sobre: la demostración y aplicación de las ecuaciones para determinar el patrón de flujo en tuberías, utilizando coeficientes adimensionales, de vertedero y de resistencia. De igual forma, describió el comportamiento de los fluidos mediante ecuaciones para el cálculo de variación de la presión; determinó la pérdida de carga y el desenvolvimiento de coeficientes adimensionales.*

Uno de sus mejores trabajos fue un compendio de tres volúmenes, el cual tituló:

“Lehrbuch der Ingenieur – und Maschinen – Mechanik”.

A partir del cual, moderniza y transforma a la mecánica de los fluidos en una parte integral de la ingeniería. Dicho trabajo fue publicado en Alemania, en el año de 1850. Entre otros estudios e investigaciones, relacionados con la dinámica de los fluidos, abordó una gran número de temas en relación con; equilibrio y presión del agua en vasos, acción molecular del agua, equilibrio y presión del aire, teoría del flujo del agua, flujo de agua en tuberías, resistencia a contracciones y expansiones, flujo en ríos y canales, así como medición, impulso y resistencia de los fluidos. Sin embargo, de todas estas contribuciones que realizó este gran científico, la que más mereció el crédito por su trabajo fue el desarrollo de la ecuación de **Darcy – Weisbach, en el año de 1845:**

$$H_f = \frac{\Sigma F}{M} = f_D \frac{u^2 \cdot L}{2g_c \cdot D}$$

Donde: H_f ; es la pérdida de fricción principal, por unidad de masa

f_D ; es el factor de fricción Darcy en la tubería

u ; es el promedio de la velocidad al cuadrado

L ; es la longitud de la tubería

D ; es el diámetro de la tubería

g_c ; es el factor de conversión.

Es muy importante mencionar que la ecuación de Weisbach, no proporcionaba en aquel entonces, suficientes datos adecuados, para la variación del factor de fricción; f , con respecto a la velocidad. Así, la ecuación propuesta por Weisbach, en 1845, no resultó más satisfactoria que la de **Gaspard Clair Francois Marie Riche de Prony (1755 – 1839)**. De amplio uso en aquel entonces:

$$H_f = \frac{L(aV + bV^2)}{D}$$

Donde: a y b; representan factores empíricos para el factor de fricción en relación con la velocidad y la velocidad al cuadrado. En el año de 1770, **Antoine de Chezy (1718 – 1798)**, publicó una ecuación para el flujo uniforme en canales abiertos, que se reducía a la misma forma, pero desafortunadamente la mayoría de estos trabajos, fueron perdidos y olvidados por algunos años. No fue sino hasta el año de 1800, en que un ex - alumno del ingeniero Antoine Chezy, mejor conocido como *Riche de Prony* (1755 – 1839), desarrolló asombrosamente su propia ecuación, pero se cree que aquel tiempo Weisbach, estaba enterado del trabajo de Chezy y de la publicación de Prony. Y para el año de 1857, *Henri Darcy* (discípulo de Prony), publica las nuevas relaciones para los coeficientes de Prony, basados en un gran número de experimentos. Su nueva ecuación fue:

$$H_f = \frac{L}{D} \left[\left(c + \frac{d}{D^2} \right) V + \left(d + \frac{e}{D} \right) V^2 \right]$$

Donde: c, d y e; representaban coeficientes empíricos para un tipo dado de tubería. Así fue como Darcy introdujo el concepto de rugosidad en tuberías en relación con el diámetro de las mismas, y que hoy en día nosotros conocemos con el nombre de; **rugosidad relativa** (ϵ / D), cuando aplicamos el diagrama de Moody. Por lo tanto, es tradicional llamar a **f**, como: **el “factor de fricción Darcy”**, (f_D), aunque si bien Darcy, nunca lo propuso en esa forma.

Para el año de 1877, **John Thomas Fanning (1837 – 1911)**, un ingeniero hidráulico de origen americano, fue el primero en relacionar juntos ambos valores, y publicó una larga serie de compilaciones para el factor de fricción Darcy; f_D , como función del material del tubo, así como del diámetro y la velocidad. Los datos que él obtuvo fueron sacados de publicaciones francesas, americanas, inglesas y alemanas, pero la mejor fuente ó recurso de sus investigaciones fueron las publicaciones del ingeniero Henri Darcy. No obstante, debe tomarse en cuenta que el ingeniero Fanning, utilizó el radio hidráulico, en vez del diámetro, en la ecuación de la fricción. Así el **“factor de fricción Fanning”** vale únicamente $\frac{1}{4}$ del valor, en el factor de fricción Darcy:

$$F_D = 4 f_f$$

(véase biografía de John Thomas Fanning).

La ecuación de Darcy – Weisbach, no tuvo un uso universal y útil, hasta el desarrolló del diagrama de Moody, en el año de 1944. Y no fue sino hasta el año de **1946**, en que el ingeniero **Hunter Rouse (1906 – 1996)**, llamó a esta ecuación con el nombre de; **“Darcy – Weisbach”**, pero dicho nombre no llegó a ser de uso universal hasta la década de los ochentas. Desde un punto de vista práctico, dicha ecuación ha llegado a ser popular desde la invención de las calculadoras electrónicas. Finalmente por la gran cantidad de intereses científicos que tuvo Weisbach, en el campo de la investigación y la docencia, publicó *14 libros y 59 obras que el mismo escribió, sobre varios temas relacionados con; mecánica, hidráulica y matemáticas*. Pero es realmente en el campo de la hidráulica, donde están sus mejores trabajos, debido a que varias de sus publicaciones al comenzar el siglo **XX**, siguieron siendo de gran importancia. Otras áreas de interés para Weisbach, fueron las relacionadas con el desarrollo de la enseñanza de la geometría descriptiva, la cristalografía, la óptica, la mecánica y el diseño de maquinaria; especialista en minería.

Entre algunos de los honores que recibió Julius Ludwig Weisbach por sus contribuciones a la ciencia, sobresalen: algunos reconocimientos que obtuvo en la ciudad de Leipzig, al igual que la elección de miembro de distinguidas sociedades, entre estas: la Academia de Ciencias de St Petersburgo y la Real Academia de Ciencias Sueca. Murió el día **24** de febrero de 1871, en la ciudad de Freiberg (Alemania), a sus 65 años de edad.

Gaspard Clair Francois Marie Riche de Prony (1755 – 1839), distinguido ingeniero hidráulico y civil de origen francés, nació el día 22 de julio de 1755 en la ciudad de Chamelet cerca de Beaujolais (Francia). Llevó a cabo sus estudios de educación universitaria en el Instituto *École des Ponts et Chaussées* (1776), en donde adquirió ciertos conocimientos y habilidades sobre el área de ingeniería, y más tarde se especializó en la construcción de diversas obras de tipo civil e hidráulico, entre estas: **puentes, caminos y drenajes**. Años más tarde, debido al prestigio académico que tuvo, fue nombrado director del instituto *École des Ponts et Chaussées*. Durante el periodo comprendido entre 1805 y 1812, realizó grandes obras de ingeniería para el acondicionamiento de varios canales, entre estas la remodelación y transformación de los puertos de Dunkerque, Génova, Ancona, la Spezia y Venecia.



3.9 Gaspard Clair Francois Marie Riche de Prony (1755 – 1839).

También se le acredita la invención del freno dinamométrico (1821), y en honor al científico francés, a dicho instrumento de medición se le conoce con ese nombre. Entre sus aportaciones más importantes con las que contribuyó Riche de Prony, al desarrollo de la mecánica de los fluidos, sobresalen: un gran número de estudios y experimentos relacionados con las formulaciones sobre las pérdidas de energía, así mismo extendió la estrecha relación de resistencia formulada por Chezy y Coulomb. Otros estudios del ingeniero Riche de Prony concernían sobre: la medida de la velocidad del sonido en el aire, los cuales efectuó en compañía del físico y astrónomo francés *Dominique Francois Jean Arago* (1786 – 1853), en el año de 1822. Uno de los mejores honores que recibió Riche de Prony por sus contribuciones a la ciencia, fue el nombramiento de socio distinguido de la Real Sociedad de Londres en el año de 1818. Murió el día 29 de julio de 1839, en París - Francia, a sus 84 años de edad.

John Thomas Fanning (1837 – 1911), distinguido ingeniero hidráulico y civil de origen americano, nació el día 31 de diciembre de 1837 en la ciudad de Norwich, Connecticut (U.S.A). En los primeros años de su vida recibió una educación de tipo privado, en escuelas primarias y secundarias de su ciudad natal, posteriormente estudió arquitectura hasta el año de 1858. Durante los próximos tres años, se dedicó al perfeccionamiento y a la construcción de diversas obras de tipo civil, entre estas: puentes, caminos y edificios.



**Figura 3.10 John Thomas Fanning
(1837 – 1911)**

Mientras se dedicaba al diseño y a la construcción de obras publicas, invertía la mayor parte de su tiempo, en estudios de tipo teórico; ingeniería civil y mecánica. En el año de 1861, empezó a prepararse para ingresar al 3^{er} regimiento privado de la ciudad de Connecticut, y como resultado de estos hechos, logró obtener el grado de teniente coronel. Cabe mencionar que el ingeniero Fanning, empezó a desarrollar la práctica general de la ingeniería y de la arquitectura hasta el año de 1862, y en ese mismo año, abrió su propia oficina en la ciudad de Norwich, en donde trabajó y permaneció hasta el año de 1870. Durante ese periodo de tiempo, se encargó de un gran número de proyectos de ingeniería para la ciudad de Norwich, incluyendo el diseño y la construcción de algunas obras hidráulicas de tipo público, así como el diseño y el mejoramiento de numerosos molinos de agua para la ciudad de Nueva Inglaterra (U.S.A).

A partir de 1870 hasta 1880, fue nombrado Jefe de Ingeniero, y en este puesto trabajó como ingeniero consultor, principalmente en el área del diseño y construcción de diversas obras de tipo civil e hidráulico, entre estas: puentes, canales y drenajes. Mientras supervisaba la construcción de estos trabajos hidráulicos para las ciudades de Manchester y Nueva Hampshire, decidió cambiar su oficina de trabajo, en la ciudad de Manchester, en donde se encargó del diseño y construcción de edificios públicos. A finales del año de 1880, fue visitado por una asociación de ingenieros civiles de las ciudades de Nueva York y Brooklyn, con el propósito de hacer un informe de actividades.

Ese informe de actividades trataba sobre el abastecimiento de agua pública, para estas ciudades, y de algunas otras ciudades en el Valle de Hudson, abarcando desde la línea divisora de las aguas superiores del río Hudson, hasta la vertiente o cuenca del mismo. Este proyecto contemplaba un acueducto de 225 millas de longitud (363 kilómetros de longitud), y transportaba diariamente 1,000, 000, 000 galones de agua, desde la región de Adirondack, hasta Nueva York y Brooklyn. Dicho proyecto contempló un costo estimado de \$60, 000, 000.

Entre las aportaciones más importantes de Fanning, para el desarrollo de esta ciencia de los fluidos, sobresalen: un gran número de estudios e investigaciones relacionadas con la resistencia de los fluidos, principalmente con las pérdidas por fricción en tuberías. Como ya se dijo en el año de 1877, relacionó varios valores para el factor de fricción Darcy (f_D), en función del material del tubo, del diámetro y la velocidad. No obstante, debe tomarse en cuenta que el ingeniero Fanning, utilizó el radio hidráulico, en vez del diámetro en la ecuación de la fricción. Así el, “**el factor de fricción fanning**”, vale únicamente un cuarto del valor, en el factor de fricción Darcy:

$$f_D = 4 f_f$$

Para el caso del factor de fricción Fanning en tuberías, la ecuación de *Darcy – Weisbach*, toma ahora la siguiente forma:

$$H_f = \frac{\Sigma F}{M} = f_f \frac{2u^2 \cdot L}{g_c \cdot D}$$

En el **régimen laminar** ($Re < 2100$), el factor de fricción Darcy y el factor de fricción Fanning, se definen ahora de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$f_D = \frac{64}{Re} \qquad f_f = \frac{16}{Re}$$

Cabe mencionar que en el régimen laminar, el valor que se tiene para el factor de fricción en tuberías, es independiente de la rugosidad relativa, y sólo depende del número de Reynolds. En el año de 1877, John Tomas Fanning, publicó en Nueva York, uno de sus mejores tratados sobre hidráulica, el cual tituló:

“Treatise on Hydraulic and Water Supply Engineering”.

Dicho tratado fue de gran ayuda en el desarrollo de esta ciencia, ya que sirvió para el desarrollo del factor de fricción Fanning en tuberías.

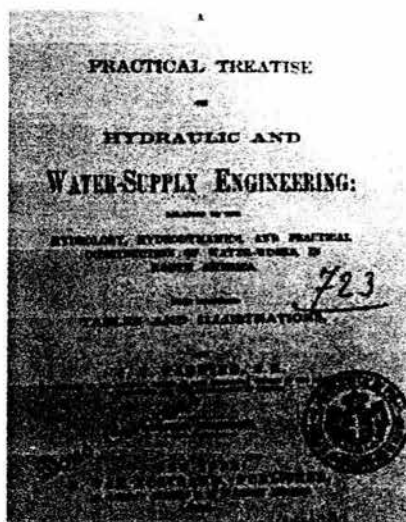


Figura 3.11 Tratado de Fanning sobre hidráulica, publicado en New York, en el año de 1877.

Algunos otros avances con los que contribuyó Fanning, para el desarrollo de esta ciencia fueron: el diseño y la patente de muchos ingenios hidráulicos, entre estas; una rueda hidráulica, una válvula de motor para turbina, una caldera de vapor y una máquina de vapor para bombeo (muy útil en aquella época para el mejoramiento y el diseño de equipos hidráulicos a prueba de incendio), así mismo se le acreditan, otros diseños originales para el desarrollo de máquinas hidráulicas. En el año de 1885, empezó a desarrollar varios proyectos para el mejoramiento de muchos diseños hidráulicos, los cuales sirvieron para el restablecimiento de las obras hidráulicas del pueblo de San Antonio (a la altura del río Mississippi), en la ciudad de Minneapolis, Minnesota.

Como resultado de estos proyectos, en 1886, construyó nuevas presas para reestructurar estos trabajos. Por esa misma época fue nombrado ingeniero consultor, y durante su estancia en este puesto, se encargó del diseño y suministro del drenaje en el Valle del río Rojo de esa ciudad. Así mismo supervisó y dirigió el diseño topográfico de este proyecto, el cual contaba con un área aproximada de 3000 millas cuadradas de extensión de tierra; ese proyecto contempló un costo estimado de \$3, 000, 000.

Entre algunos de los honores que recibió John Thomas Fanning por sus contribuciones a la ciencia, sobresalen: algunos reconocimientos que obtuvo en la ciudad de Nueva York y Norwich, por su brillante carrera en el área de la ingeniería (hidráulica y civil), así como la elección de miembro de distinguidas sociedades, entre estas: la Sociedad Americana de Nueva Inglaterra y la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia y la Tecnología. De igual forma en el año de 1883, la Sociedad Americana de Nueva Inglaterra, le otorgó uno de los mejores Premios de Ciencia y Tecnología, por sus brillantes diseños en el área de la arquitectura, y de la ingeniería. Murió el día 14 de mayo de 1911, en la ciudad de Minneapolis, Minnesota (U.S.A), a sus 74 años de edad.

3.4 EL NÚMERO DE FROUDE

Otro de los científicos del siglo XIX, considerado como pionero por sus aportaciones a esta ciencia fue **William Froude (1810 – 1879)**. En el área de los fluidos, se le acreditan un gran número de estudios e investigaciones sobre: la ley de similitud en mecánica de fluidos, al aplicar y utilizar modelos, para predecir la resistencia de los barcos; desarrolló muchas técnicas de remolque de recipientes, en particular, sobre; la conversión de resistencia de onda, y en la capa límite a partir del modelado de prototipos a escala.



Figura 3.12 William Froude
(1810 – 1879).

William Froude distinguido ingeniero naval y arquitecto de origen inglés, nació el día 28 de noviembre de 1810 en la ciudad de Dartington Devon (Gran Bretaña). Miembro de una familia literaria y académica. Al parecer su hermano, fue un distinguido historiador llamado **James Anthony Froude (1818 – 1894)**. En los primeros años de su vida William Froude, trabajó como ingeniero civil para el sistema de ferrocarriles británicos, después de haber efectuado estudios en la universidad de Oxford. Sin embargo, el mar y los barcos habían ejercido siempre en él, una fascinación muy especial, por lo que pronto comenzó a conducir experimentos sobre la resistencia de los barcos, utilizando pequeños modelos en las orillas de los ríos. Años más tarde, adquirió los conocimientos y la formación como ingeniero naval, y a la edad de 36 años, sobresalió con el descubrimiento de las leyes que indicaban el comportamiento de un modelo,

utilizando tanques para pruebas experimentales. Dichas investigaciones podían ser extrapoladas a los barcos reales, cuando ambos modelos tenían las mismas relaciones geométricas, las cuales eran de particular importancia en aquel tiempo, ya que la máquina de vapor, estaba reemplazando a las velas como la principal fuerza motriz, y debido a que en aquel entonces, se necesitaba un diseño más científico y eficiente de los cascos al igual que las propelas. Con el resultado de estas investigaciones se pudieron construir buques más seguros, eliminando muchos errores de diseño mediante la aplicación de pruebas rigurosas, sobre modelos precisos y a escala de las naves marítimas. Estos trabajos fueron de gran importancia para la armada británica, debido a la mejora y eficiencia de sus barcos. Entre otros descubrimientos también se le acredita a William Froude, un modelo de freno hidráulico, para predecir los pares motores, propuesto por él en el año de 1858. Cabe mencionar que la mayoría de los descubrimientos que efectuó William Froude, fueron prontamente aplicados en todo el mundo, sobre: el diseño y el mejoramiento de naves marítimas, utilizando pruebas experimentales. Una de sus mejores publicaciones fue una obra titulada:

“Experiments on the Surface – friction experienced by a Plane moving through Water”.

Dicho trabajo fue publicado en el año de 1870, y para el año de **1872**, indicó la importancia que tenía la relación entre la velocidad de un barco (fuerza de inercia), con respecto de la longitud del mismo (fuerza de gravedad); relación muy conocida en la construcción de barcos, y que actualmente se le conoce como **el número de Froude**. Dicha relación es el parámetro adimensional y básico en el análisis de los modelos hidráulicos. Es muy importante mencionar que el número de Froude, había sido publicado 20 años antes por **Ferdinand Reech (1805 – 1880)**, un distinguido catedrático de origen alemán, dedicado a la enseñanza de la ingeniería en el colegio naval de París. Sin embargo, William Froude fue el primer científico en observar el desarrollo a lo largo del casco de las naves. Y en honor al científico inglés, a dicha relación se le conoce con ese nombre. **Número de Froude:**

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{L_g}}$$

Donde: F ; es el número de Froude, V ; es la velocidad del barco o fuerza de inercia, y L_g ; es la longitud del barco o fuerza de gravedad. El número de Froude es el parámetro adimensional de semejanza en los problemas con predominio de la fuerza de gravedad, cuanto menor es dicho número, mayor es la importancia de la fuerza de gravedad y viceversa. Cabe mencionar que **Osborne Reynolds (1842 – 1912)**, fue el primer científico que utilizó la ley de Froude de semejanza, en pruebas modelo para la acción de mareas en el estuario de Mersey, y en el año de 1888, publicó un trabajo al respecto, el cual tituló:

“On Certain Laws Relating to the Regimen of Rivers and Estuaries, and on the Possibility of Experiments on a Small Scale”.

En mecánica de fluidos existe ahora, otra forma de expresar también el número de Froude, cuando se aborda el tema de agitación en flujo de fluidos. La agitación se puede llevar a cabo en tanques, con deflectores de mamparas ó sin estas. Si el tanque no tiene mamparas se presentan vórtices (remolinos), entonces se requiere del uso este número adimensional, el cual toma en cuenta los efectos del vórtice:

$$F_r = \frac{D_a^2 \cdot N}{g}$$

Donde: F ; es el número de Froude

D_a ; es el diámetro del impulsor

N ; es la velocidad de rotación en r.p.m

g ; es la fuerza de gravedad.

Durante el periodo comprendido entre 1871 y 1872, se dio un cambio en la historia de los modelos marítimos en el mundo gracias a William Froude. En aquel tiempo este científico, inició una cadena de acontecimientos en su ciudad natal, que llevarían a Gran Bretaña a la vanguardia de la innovación tecnológica de aquella época, y conducirían a su debido tiempo al desarrollo y establecimiento de la investigación principal, sobre el modelo de naves marítimas a nivel mundial, en un remanso mejor conocido como el puerto **Portsmouth**, el primer canal de ensayos.

El primer modelo en el mundo en experimentar y utilizar, con las técnicas de Froude, fue una versión miniatura denominada; **HMS Greyhound**, propuesto en el año de 1871. Es muy importante mencionar que William Froude contaba siempre con la ayuda de su hijo **Robert Edmund Froude (1846 – 1924)**, considerado como su brazo derecho, y que siempre lo apoyó en sus empresas. Muchos de los trabajos y publicaciones, que llevaron a cabo los Froudes (padre e hijo), son todavía utilizados por los arquitectos navales de hoy en día, como estándares de referencia, en los problemas básicos de la investigación sobre modelos marítimos. Como resultado de estos hechos William Froude, es considerado como pionero, debido a la excelencia de sus trabajos relacionados en el campo de la investigación; **marítima e hidrodinámica**. Algunos de los proyectos que dirigió William Froude, se aprecian en la siguiente figura.

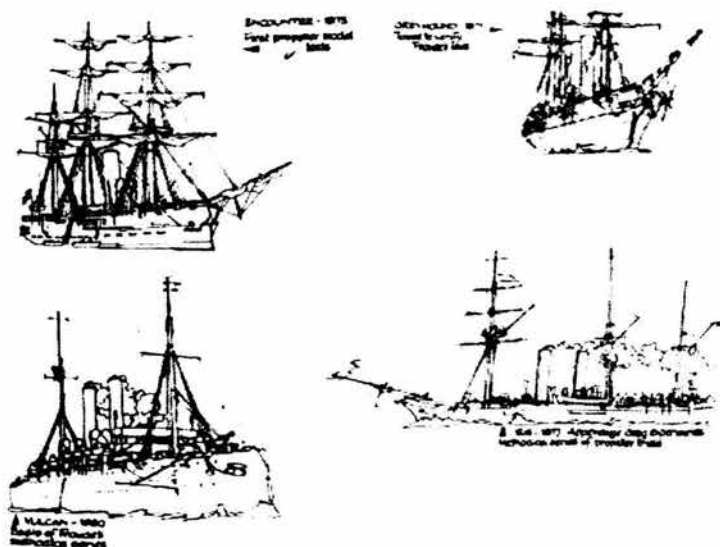


Figura 3.13 Algunos proyectos marítimos que llevó a cabo el ingeniero William Froude.

William Froude, recibió en vida muchos honores por sus contribuciones a la ciencia, pero en particular uno de los mejores honores que recibió fue el nombramiento de socio distinguido del Instituto de Arquitectos Navales de la ciudad de Torquay, en el año de 1872. Dicha institución fue apoyada económicamente por la British Admiralty. Murió el día 4 de mayo de 1879, en República de Sudáfrica, a sus 68 años de edad.



**Figura 3.14 Robert Edmund Froude
(1846 – 1924)**

Robert Edmund Froude distinguido ingeniero hidráulico y civil de origen inglés, nació el día 24 de octubre de 1846 en la ciudad de Dartington Devon (Gran Bretaña). Al igual que su padre (William Froude), tuvo un gran interés en el diseño de los barcos y los tanques de remolque; pues relacionó correctamente las fuerzas gravitacionales de las fuerzas inerciales. También desarrolló varios métodos de predicción, para el cálculo de flujo de fluidos en canales abiertos. Murió el día 09 de junio de 1924, en la ciudad de Terling Witham Essex (Inglaterra), a sus 77 años de edad.

3.5 LA ECUACIÓN DE MANNING PARA FLUJO DE FLUIDOS EN CANALES ABIERTOS.

Por esa época, otro de los científicos que también hizo contribuciones a la mecánica de los fluidos fue **Robert Manning (1816 – 1897)**. Sobresaliente por sus estudios e investigaciones, al proporcionar varias fórmulas para el cálculo de resistencia en canales abiertos.



**Figura 3.15 Robert Manning
(1816 – 1897)**

Robert Manning distinguido ingeniero hidráulico y civil de origen irlandés, nació el día 22 de octubre de 1816 en la ciudad de Normandía (región histórica cerca del norte de Francia), donde vivió algún tiempo, pocos años después Manning y su madre se mudaron a Waterford (Irlanda), en el año de 1826, después de la muerte de su padre. En los primeros años de su vida trabajó como oficinista, contador y dibujante, hasta que fue nombrado asistente de ingeniero. Posteriormente en el año de 1848, fue nombrado ingeniero del distrito, y en el año de 1849, empezó a trabajar como ingeniero de drenajes, puesto que ocupó hasta el año de 1855. Desde 1855 hasta 1869, ocupó el puesto de supervisor de diversas obras de tipo civil e hidráulico, en los estados de Irlanda, bajo el mando del Marqués de la ciudad de Downshire. Uno de sus mejores proyectos fue la construcción del puerto de Dunderum, así como el diseño y suministro del agua, a la ciudad de Belfast. Años más tarde, después de la muerte del Marqués de la ciudad de Downshire, Manning regresó a la

oficina de trabajos públicos, en 1869, para ocupar de nuevo el puesto de asistente de ingeniero. Para el año de 1874, fue nombrado **Jefe de Ingeniero**, puesto que ocupó hasta el año de 1891. En ese puesto fue responsable de numerosos proyectos sobre *puertos, navegación, drenajes y conducciones de aguas negras*. Es muy importante mencionar que Robert Manning, nunca recibió una educación de tipo formal sobre temas de ingeniería, relacionados con mecánica de fluidos. Sin embargo, en el año de 1851, publicó su primer trabajo sobre hidráulica, y el último en 1895. Durante este periodo de tiempo, dedicó un considerable esfuerzo por el desarrollo de una simple y homogénea fórmula, dimensionalmente consistente para el flujo en canales abiertos. Uno de sus mejores trabajos versa sobre: el flujo de agua en canales, en donde presenta una ecuación que todavía se emplea, para el diseño de drenajes.

Ecuación de Manning:

$$V = C \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

Donde: V ; es la velocidad media del fluido en el canal

C ; es el coeficiente de Manning que depende del material con el que esta construido el canal, y es función del radio hidráulico

R ; es el radio hidráulico (también se puede expresar así r_H).

S ; es la pendiente del canal.

El coeficiente de Manning, se define de acuerdo a la siguiente expresión:

$$C = \frac{1}{n} \cdot r_H^{1/6} \quad n: \text{es el coeficiente de rugosidad}$$

La ecuación anterior (para el flujo en canales abiertos), fue propuesta por Robert Manning en el año de **1885**, y fue obtenida en base a los experimentos y observaciones que anteriormente había efectuado en el río Mississippi. De igual forma tomó en cuenta las observaciones del ingeniero francés **Henri Émile Bazin (1829 – 1917)**. Una de sus últimas publicaciones de Robert Manning, sobre el tratado de la hidráulica fue una obra titulada:

“On the Flow of Water in Open Channels and pipes”.

Dicha publicación sirvió como recurso para la divulgación científica de su ecuación, y fue llevada a cabo por la institución de ingenieros civiles de Irlanda, en compañía del ingeniero Robert Manning en el año de **1891**, cuando él fue nombrado Presidente de esta Sociedad. Cabe mencionar que Robert Manning en sus trabajos continuamente hacía referencia a los grandes pioneros de la ingeniería hidráulica, entre ellos: Antoine de *Chezy*, *Henri Bazin* y *Henri Darcy*. Murió el día 9 de diciembre de 1897, en Irlanda (Reino Unido), a sus 82 años de edad.

3.6 EL NÚMERO DE MACH

Uno de los científicos del siglo XIX, considerado como pionero por sus aportaciones a la aerodinámica supersónica fue **Ernst Mach (1838 – 1916)**, debido a que demostró la existencia de los flujos supersónicos, y de las ondas de choque.



Figura 3.16 Ernst Mach
(1838 – 1916)

Ernst Mach distinguido filósofo, físico y psicólogo de origen austriaco, nació el día 18 de febrero de 1838 en la ciudad de Turas Moravia (Checoslovaquia), descendiente de una familia alemana, cuyo nombre al parecer era de origen checo. Llevó a cabo a cabo sus primeros estudios en el Gimnasio de Kromeriz, posteriormente ingresó a la universidad de Viena, en donde estudió; *matemáticas, física y filosofía*. Años más tarde fue profesor de la universidad de Viena (1895), así como de las universidades de Graz, y de Charles en Praga. Sus primeros trabajos en el campo de la física fueron dedicados al estudio de la descarga y la inducción eléctrica, muchos de los cuales fueron de gran importancia y utilidad por la aplicación de las matemáticas en diversas áreas de la física, entre estas; ***óptica, mecánica y la propagación de onda***. Durante el periodo comprendido entre 1860 y 1862, dedicó un considerable esfuerzo, en el estudio del Efecto Doppler, de gran interés en ***óptica y acústica***.

Dichas investigaciones sirvieron de base para demostrar su amplia capacidad y talento, como uno de los mejores investigadores en el diseño de aparatos de medición precisos. En el año de 1864, Ernst Mach llegó a ser profesor de matemáticas en la universidad de Graz, y en el año de 1866, fue nombrado profesor de física; durante este periodo de tiempo también estuvo interesado por la fisiología de la percepción sensorial. Para el año de 1867, llegó a ser profesor de física experimental en la universidad de Charles en Praga, debido a su amplio conocimiento y experiencia sobre estos temas. Poco tiempo después debido al gran prestigio académico que tuvo fue nombrado rector de dicha universidad durante el periodo comprendido entre 1879 y 1884. Cabe mencionar que por la gran cantidad de intereses científicos que tuvo Mach, por el campo de la investigación y la docencia, relacionados con el estudio de la física, publicó 90 artículos y 6 libros, que el mismo escribió durante su estancia en Praga entre los años de 1867 y 1895. Mas tarde publicó otro de sus mejores trabajos sobre: la fisiología de los órganos sensoriales.

Es muy importante mencionar que la mayor parte de sus estudios de Mach, sobre el campo de la física experimental fueron dedicados a la investigación de; la acústica y óptica física. Dichos estudios concernían sobre varios temas relacionados con; la difracción, interferencia, polarización y refracción de la luz, en diversos medios bajo la acción de influencias externas. Entre otros estudios e investigaciones, también se le acredita un amplio desarrollo sobre nuevos métodos experimentales, tales como: *estroboscopia* y *fotografía*, los cuales fueron prontamente seguidos por sus importantes exploraciones en el campo de la velocidad supersónica. De hecho su primer trabajo sobre este tema fue publicado en el año de **1877**, en el cual describe correctamente los efectos del sonido observados, durante el movimiento supersónico de un proyectil.

Poco tiempo después, Ernst Mach dedujo y confirmó experimentalmente la existencia de; ***una onda de choque acústica que tiene la forma de un cono, junto con el proyectil en el ápice ó cima.*** Esta es su más famosa contribución en el campo de la física, y es el resultado de analizar ondas de tipo acústico, y la propagación de onda, usando técnicas ópticas y fotográficas, cuya representación matemática producía modelos de la ecuación diferencial, asociados al comportamiento del fenómeno en estudio. El número de Mach relaciona el cociente entre la velocidad de un móvil (proyectil ó avión), con respecto de la velocidad del sonido, cuya expresión es la siguiente:

$$M = \frac{V}{C}$$

Donde: M ; es el número de Mach

V ; es la velocidad del móvil (proyectil ó avión)

C ; es la velocidad del sonido.

El número de Mach es el parámetro adimensional de semejanza en los problemas con predominio de la elasticidad. Cuanto mayor es el número de Mach menor es la importancia de la elasticidad, y viceversa. **Si el número de Mach $M < 1$, la corriente se denomina subsónica; si $M = 1$, la corriente se denomina transónica; si $M > 1$, la corriente se denomina supersónica.** Dicho número juega un papel muy importante en el campo de la investigación; *aerodinámica e hidrodinámica*. Es muy importante mencionar que en el caso de los líquidos, la velocidad del sonido varía solo ligeramente con la temperatura y la presión, mientras que en los gases sucede lo contrario. Los problemas en los que tiene importancia el número de Mach, son aquellos en donde interviene el efecto de la compresibilidad. En mecánica de fluidos, se suele emplear para medir la velocidad de los gases con respecto a la velocidad del sonido; pues se emplea para la descarga de gases, cuando se aborda el tema de flujo de fluidos compresibles a temperatura constante. Cabe mencionar que la velocidad máxima posible, que alcanza un fluido en una tubería, es la del sonido. En este caso el número de Mach, se define de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Mach = \frac{\text{velocidad del gas } (u)}{\text{velocidad del sonido } (u_s)}$$

La velocidad del sonido en este caso, se define de acuerdo a la siguiente expresión:

$$u_s = \sqrt{\frac{k \cdot g_c \cdot P_s}{\rho_s}}$$

Donde: u_s ; es la velocidad del sonido ($3.00 \cdot 10^8$ m / s)

K ; es una constante que depende de las propiedades del gas

g_c ; es el factor de conversión

P_s ; es la presión del flujo de gas

ρ_s ; es la densidad del gas

Poco tiempo después, Ernst Mach enunció su famoso principio, el cual dice:

“La masa inercial no es una característica intrínseca de un móvil, sino una medida de su acoplamiento con el resto del Universo”.

Y con el resultado de estas investigaciones, criticó los principios de la mecánica newtoniana. Una de sus mejores obras de carácter filosófico, fue titulada; ***El conocimiento y el error***. Dicha obra fue publicada en el año de 1905, y con esta última contribuyó a fundamentar el empiriocriticismo junto con la obra del escritor y filósofo alemán ***Richard Avenarius (1843 – 1896)***. Muchas de las teorías de Mach sobre el tema de la inercia fueron de gran importancia para Alberto Einstein (1879 – 1955), debido a la gran cantidad de intereses que tuvo, al sentirse inspirado por Mach, y por su gran cantidad de trabajos que concernían sobre: la teoría de la relatividad.

Entre algunos de los honores que recibió Ernst Mach por sus contribuciones a la ciencia, sobresalen: algunos reconocimientos que obtuvo como Doctor honoris causa por parte de las Universidades de Graz y de Charles en Praga. Murió el día 19 de febrero de 1916, en la ciudad de Vaterstetten (Alemania), a sus 78 años de edad.

3.7 EL NÚMERO DE REYNOLDS

A finales del siglo XIX, los experimentos realizados por **Osborne Reynolds (1842 – 1912)**, comenzaron a mostrar las posibles aplicaciones de las ecuaciones de *Navier – Stokes*. Dichas investigaciones sirvieron de base para el establecimiento y concepto, de dos diferentes tipos de régimen: *el laminar y el turbulento*.



Figura 3.17 Osborne Reynolds
(1842 – 1912).

Osborne Reynolds distinguido ingeniero y catedrático de origen británico, nació el día 23 de agosto de 1842 en la ciudad de Belfast (Irlanda). Miembro de una familia religiosa y académica. Al parecer su padre, fue un distinguido sacerdote de la Iglesia Anglicana, quién además contaba con cierto grado académico. En los primeros años de su vida se educó en compañía de sus padres, poco tiempo después llevó a cabo sus primeros estudios de educación primaria en la ciudad de Dedham Essex (Inglaterra), cuando su padre era el director de aquel colegio. Durante su juventud trabajó en un taller mecánico, posteriormente llevó a cabo sus estudios de educación secundaria en una institución de tipo privado. Después de completar dichos estudios, decidió no ingresar directamente a la universidad; sin embargo, empezó a trabajar en una firma de ingeniería, donde adquirió cierto nivel de experiencia y aprendizaje. La firma de ingeniería estaba bajo la dirección del ingeniero; **Edward Hayes**, en el año de 1861. Mas tarde decidió estudiar matemáticas en Cambridge, donde se

graduó con mención honorífica en el año de 1867. Para el año de 1868, Osborne Reynolds llegó a ser el primer profesor de ingeniería en la Universidad de Manchester, (y el segundo en Inglaterra). En ese mismo año se hizo cargo de una cátedra especial para ingenieros que acababa de crear la Universidad de Manchester; puesto que desempeñó hasta el año de 1905. Cabe mencionar que dicha universidad, había sido anteriormente mejor conocida con el nombre de **The Owens College**. Algunas de las primeras investigaciones de Osborne Reynolds, versaban sobre: el magnetismo y la electricidad, pero poco tiempo después, se interesó, por varios temas relacionados con; *la hidráulica y la hidrodinámica*.

Por esa misma época, también realizó estudios e investigaciones sobre: las propiedades electromagnéticas del sol, y de los cometas, así mismo consideró la importancia que tenían los movimientos de las mareas en los ríos. En el año de 1873, Reynolds se interesó por el estudio de la dinámica de los fluidos, y sería en esta área de la investigación, donde sus contribuciones tendrían mayor importancia y éxito en todo el mundo. Dichas investigaciones concernían sobre; el estudio y caracterización de dos diferentes tipos de régimen, a lo largo de tuberías, cuando un fluido pasa de un estado de movimiento a otro; **flujo laminar a flujo turbulento (flujo viscoso)**. En el año de 1883, llevó a cabo su famoso experimento, el cual sirvió para poner en evidencia las diferencias entre; *flujo laminar y flujo turbulento*. Dicho experimento consistía en inyectar colorante sobre el seno de un líquido, el cual circulaba por un largo tubo de sección circular constante.

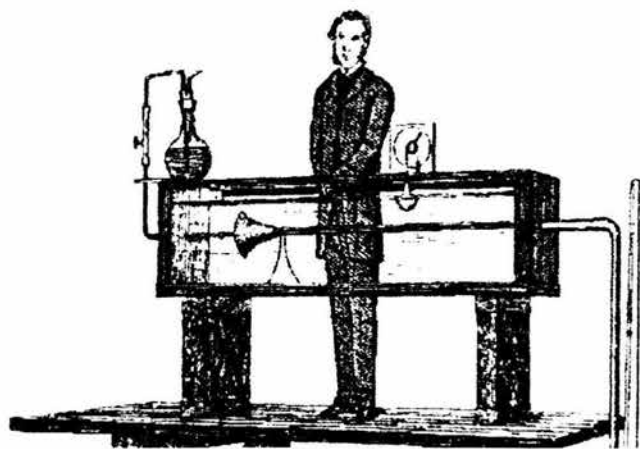


Figura 3.18 El experimento de Reynolds.

En el experimento mostrado en la figura 3.18, el movimiento del líquido se caracterizó por ser permanente, debido a que las líneas de corriente eran paralelas a las paredes del tubo. Sin embargo, Reynolds observó que dicho movimiento sólo existe, si la velocidad del flujo es suficientemente pequeña, ó si el diámetro del tubo es suficientemente pequeño, para un determinado caudal. Bajo estas circunstancias, el colorante forma una línea de corriente bien definida, cuyo contorno muestra que sólo existe una pequeña difusión en la dirección radial, debida al transporte molecular. Cabe mencionar que estas investigaciones, dieron el crédito a los trabajos del ingeniero **Ludwig Hagen (1797 – 1884)**, realizados 30 años antes. En el año de 1886, Osborne Reynolds formuló su famosa teoría de la lubricación, y en 1889, propuso un modelo de característica teórica sobre el estudio del flujo turbulento. Dicho modelo ha llegado a ser el estándar ó el marco matemático utilizado en el estudio de la turbulencia. Otros estudios de Reynolds versaban sobre: la estabilidad hidrodinámica, los cuales fueron publicados entre los años de 1883 y 1885. Durante este periodo de tiempo también efectuó un gran número de ensayos sobre; la propulsión por hélice, así mismo estudió el comportamiento dinámico de los fluidos viscosos. En el año de 1883, publicó uno de sus mejores trabajos, el cual tituló; ***“An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous and of the law of resistance in parallel channels”***. Con el resultado de estas investigaciones, demostró la importancia de una relación ó cociente conocido como **el número de Reynolds**. Dicha relación ó número adimensional interviene de manera constante en muchas aplicaciones de flujo de fluidos, transferencia de calor y de masa. Y en honor al científico británico, a dicha relación se le conoce con ese nombre:

$$Re = \frac{D \cdot V \cdot \rho}{\mu}$$

Donde : Re ; es el número de Reynolds

D ; es el diámetro de la tubería

V ; es la velocidad promedio del fluido

ρ ; es la densidad del fluido

μ ; es la viscosidad del fluido.

El número de Reynolds es el parámetro adimensional de semejanza en los problemas con predominio de la viscosidad. Cuanto mayor es el número de Reynolds menor es la importancia de la viscosidad, y viceversa. Dicho número también representa una relación entre; las fuerzas de inercia y de viscosidad, en una corriente de fluido. Osborne Reynolds determinó que la transición de flujo laminar a flujo turbulento, era función de un único parámetro, que desde entonces se conoce como; el número de Reynolds. **Si $Re < 2100$ entonces tenemos flujo laminar; si $Re > 4000$ entonces tenemos flujo turbulento.** En el régimen laminar, la estructura del flujo se caracteriza por un movimiento continuo en forma de láminas ó capas, y a bajas velocidades las partículas del fluido siguen las mismas líneas de corriente. Figura 3.19.

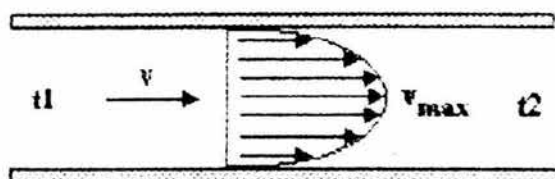


Figura 3.19 Flujo laminar a baja velocidad en la tubería
Por lo tanto; $V_{max} = 2 V$ promedio.

En cambio en el régimen turbulento, este se caracteriza por movimientos tridimensionales, al azar, de partículas del fluido que se asuman al movimiento promedio, y a velocidades más altas, surgen fluctuaciones en la velocidad del fluido, en forma de remolinos. Figura 3.20.

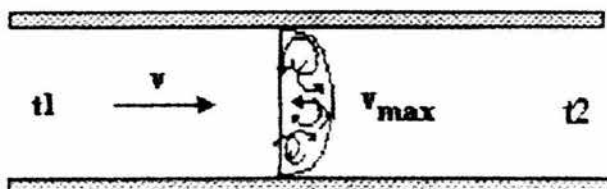


Figura 3.20 Flujo turbulento a alta velocidad en la tubería
Por lo tanto; $V_{máx} = 1.2 V$ promedio.

Algunos otros estudios de Reynolds versaban sobre: la condensación y la transferencia de calor, entre sólidos y líquidos, los que trajeron como resultado la revisión radical de la caldera, y el diseño del condensador. Mientras que sus trabajos sobre el perfeccionamiento de las bombas y las turbinas, permitieron un rápido y eficiente desarrollo; fue propietario de muchas patentes de turbinas

y bombas hidráulicas. De igual forma introdujo perfeccionamientos en los frenos hidráulicos, y estableció los diagramas de las máquinas de expansión múltiple. Cabe mencionar que el ingeniero Osborne Reynolds, describió un gran número de experimentos de tipo original, en muchos campos de esta ciencia, entre estos; cavitación, semejanza de modelos en ríos, resistencia de tubos, así mismo concibió dos parámetros para el flujo viscoso; pues adoptó ecuaciones de movimiento de un fluido viscoso, a condiciones medias de flujo turbulento. También estudió el movimiento de los vórtices (remolinos).

Entre algunos de los honores que recibió Osborne Reynolds por sus contribuciones a la ciencia, sobresalen: algunos reconocimientos que obtuvo en Inglaterra, así como la elección de miembro de la Real Sociedad en el año de 1877 y, en 1888 ganó la Medalla Real. De igual forma en el año de 1884, la universidad de Glasgow le otorgó un grado honorario como reconocimiento por su brillante carrera científica. En el año de 1900, la salud de Reynolds comenzó a decaer, y en 1905, se retiró de muchas de sus actividades como profesor e investigador. Murió el día 21 de febrero de 1912, en la ciudad de Watchet Somerset (Inglaterra), a sus 70 años de edad.

3.8 JOHN RAYLEIGH Y SUS APORTACIONES EN EL CAMPO DE LA HIDRODINÁMICA.

Otro de los científicos del siglo XIX, notable por sus contribuciones a la ciencia fue **John William Strutt Lord Rayleigh (1842 – 1919)**. El famoso Rayleigh, versátil como algunos de sus contemporáneos, abordó problemas que siguen siendo una muestra del claro pensar de una exquisita generación de científicos. Su teoría de la propagación del sonido y algunas de sus publicaciones sobre el tratado de la hidrodinámica, son ejemplo de los intereses que tuvo por el desarrollo de la ciencia.



Figura 3.21 John William Strutt Lord Rayleigh (1842 – 1919).

John William Strutt Lord Rayleigh distinguido físico y matemático de origen inglés, nació el día 12 de noviembre de 1842, en arboleada de Langford, cerca del municipio de Maldon Essex (Inglaterra). Miembro de una familia de padres campesinos (Terratenientes), cuyos intereses en la ciencia no eran muy comunes. En los primeros años de su vida se educó en compañía de sus padres, poco tiempo después llevó a cabo sus primeros estudios de educación primaria en el colegio **Eton de Inglaterra**. Mas tarde ingresó al instituto; *Reverend Warner Boarding*, una institución de tipo privado (internado), donde permaneció cuatro años de su vida, debido a que Rayleigh presentó serios problemas de salud, durante los primeros años de su infancia. En dicha

institución se preparó para ingresar a la universidad, y realmente fue en esta etapa de su vida, donde comenzó a mostrar las primeras habilidades de tipo matemático. En octubre de 1861, ingresó al **Trinity College**, de la ciudad de Cambridge, donde adquirió ciertos conocimientos y habilidades, sobre el área de **matemáticas y física**.



Figura 3.22 El Trinity College de la ciudad de Cambridge.

Uno de los mejores colegas que tuvo Rayleigh, durante su estancia en el Trinity College fue **Edward John Routh (1831 – 1907)**, distinguido matemático de la época y famoso por sus contribuciones a la dinámica (compañero inseparable de Rayleigh). Cabe mencionar que la influencia de este brillante matemático, fue de gran ayuda para el desarrollo de la carrera científica de Rayleigh. Otra de las influencias que tuvo Rayleigh, durante su estancia en Cambridge, fueron las enseñanzas de su maestro; **George Gabriel Stokes (1819 – 1903)**. Distinguido profesor de matemáticas Lucasianas en aquel entonces, y sobresaliente por sus estudios e investigaciones en el campo de la física experimental.

En el año de 1860, John Rayleigh publicó su primer trabajo sobre: la teoría electromagnética, y en 1865, publicó una serie de investigaciones, que contribuyeron al desarrollo del *resonador acústico*. En el año de 1866, fue nombrado socio distinguido del Trinity College, debido a su amplio interés que tuvo por el desarrollo de la ciencia. Mas tarde realizó una serie de experimentos, que concernían sobre el desarrollo del galvanómetro, y poco tiempo después presentó sus resultados ante la Sociedad Británica de Norwich en el año de 1868. En 1871, publicó uno de sus mejores trabajos sobre la teoría

de la dispersión. Dicha teoría era la primera explicación correcta, que indicaba el porque el cielo era de color azul. En ese mismo año contrajo matrimonio con *Evelyn Balfur*, una hermana del primer ministro de Gran Bretaña. Poco tiempo después, comenzó a escribir uno de sus mejores trabajos, el cual tituló; ***The theory of sound***. El primer volumen, que trataba sobre el movimiento mecánico de un medio vibrante, el cual producía el sonido, fue publicado en el año de 1877, mientras que el segundo volumen que trataba sobre el movimiento acústico y la propagación de ondas, fue publicado al año siguiente. Durante el periodo comprendido entre 1879 y 1884, Rayleigh llegó a ser el segundo profesor de física en Cambridge, donde destacó como uno de los mejores catedráticos de aquella época, debido a que realizó mejoras a la enseñanza de la física durante su estancia como profesor. Algunos cursos que impartió en aquel entonces concernían sobre: transferencia de calor, electricidad, magnetismo, propiedades de la materia, óptica y acústica.

Para el año de 1887, ocupó el cargo de profesor de física, en el Instituto de la Real Sociedad de Londres, y ocho años más tarde sobresalió con uno de los descubrimientos más famosos a los largo de la historia: ***la existencia del gas argón, en el año de 1895***. Un gas noble desconocido hasta entonces, lo que permitió ampliar el sistema periódico de los elementos, y con el resultado de estas investigaciones fue galardonado con el premio novel de física en el año de **1904**, por tan brillante descubrimiento. Durante el transcurso de su carrera científica, John Rayleigh, dominó por igual todos los campos de la ciencia, y en el área de la investigación, la mayor parte de sus estudios concernían sobre el campo de la acústica, y los fenómenos relacionados con las radiaciones, en donde descubrió nuevas leyes, y métodos de medición. En la destilación es muy conocida su famosa ecuación que permite calcular la destilación de mezclas en los alambiques. También se le acredita un método de análisis dimensional (método de Rayleigh), con el cual se pueden encontrar los números adimensionales que controlan un proceso, y en honor al científico inglés, a dicha contribución se le conoce con ese nombre.

Entre las aportaciones más importantes de Rayleigh, para el desarrollo de esta ciencia de los fluidos, sobresalen: la implementación de dos dominios dentro del campo de la mecánica de los fluidos, de los cuales utilizó un método explícito de semejanza dinámica; la teoría aerodinámica de arrastre, y el tratamiento de la velocidad del sonido en el aire. También investigó la hidrodinámica del colapso entre burbujas, el movimiento de ondas, la inestabilidad de chorros, así como una analogía entre el régimen laminar, y su similaridad dinámica.

Entre algunos de los honores que recibió Sir John Rayleigh por sus contribuciones a la ciencia, sobresalen: algunos reconocimientos que obtuvo en Inglaterra, así como una orden de merito que recibió de manos del rey Edward VII, en el año de 1902. De igual forma en 1873, fue nombrado distinguido socio de la Real Sociedad de Londres, y en 1882 recibió la Medalla Real, poco tiempo después fue nombrado secretario de esta sociedad en el año de 1885. Además del premio novel de física que recibió en el año de 1904, fue galardonado con trece grados honorarios que recibió durante el trayecto de su carrera científica, así mismo recibió por parte del gobierno cinco reconocimientos por su brillante carrera, y a nivel mundial un grado de honor como distinguido socio, de cinco sociedades dedicadas a la enseñanza de la ciencia. Murió el día 30 de junio de 1919, en la ciudad de Terling Witham Essex (Inglaterra), a sus 77 años de edad.

3.9 EL NÚMERO DE WEBER

Otro de los científicos del siglo XIX, que también hizo aportaciones al desarrollo de esta ciencia fue **Moritz Ignatz Weber (1871 – 1951)**. En el área de los fluidos, se le atribuyen el uso de los principios de semejanza, en estudios de flujo de fluidos, así como la formulación de un parámetro de semejanza en capilaridad.



Figura 3.23 Moritz Ignatz Weber
(1871 – 1951).

Moritz Ignatz Weber distinguido ingeniero y catedrático de origen alemán, nació el día 29 de abril de 1871 en la ciudad de Berlín (Alemania). Fue profesor de mecánica naval y de hidráulica en el Instituto Politécnico de Berlín, en donde sobresalió con uno de sus mejores trabajos, el cual tituló:

***“Die Grundlagen der Aehnlichkeitsmechanik und ihre Verwertung
Modellversuchen.”***

Dicho trabajo fue publicado en Berlín en el año de 1919, y en este especifica los números de *Reynolds* y de *Froude*, en relación con la teoría de Cauchy, una teoría de semejanza elástica, la cual fue de gran ayuda para formular un parámetro de capilaridad, que más tarde fue llamado por **Franz Eisner (1870 – 1949)**, como **el número de Weber:**

$$W = \frac{V}{\sqrt{\sigma / \rho \cdot L}}$$

Donde: W; es el número de Weber

V ; es la velocidad del fluido

α ; es la tensión superficial por unidad de longitud

ρ ; es la densidad del fluido

L ; es la longitud del tubo ó capilar.

Es muy importante mencionar que el número de Weber, es el parámetro adimensional de semejanza en los problemas con predominio de la tensión superficial. Cuanto menor sea el número de Weber, mayor es la importancia de la tensión superficial, y viceversa. Y en honor al científico alemán, a dicha relación se le conoce con ese nombre. Uno de los mejores honores que recibió Moritz Ignatz Weber, por sus contribuciones a la ciencia fue el nombramiento de socio distinguido de la Academia de Ciencias de Berlín en el año de 1920. Murió el día 27 de noviembre de 1951, en Berlín (Alemania), a sus 80 años de edad.

CAPÍTULO 4
DEL SIGLO XX

CAPITULO 4. DEL SIGLO XX

4.1 LUDWIG PRANDTL Y LA TEORIA DE LA CAPA LIMITE

Al iniciarse el siglo XX, la relación entre la hidrodinámica teórica y la hidráulica experimental, parecía no tener futuro alguno; los intereses comunes se expresaban en lenguajes diferentes, y parecían ser muy complicados. La hidrodinámica se interesaba principalmente por el estudio de los flujos ideales (invícid), tal es el caso de los flujos viscosos laminares, y no hacía caso de los flujos turbulentos, siendo esta última la característica más importante para la hidráulica. En estas condiciones, para el año de 1904, se presentó un trabajo de tipo experimental, ante el tercer congreso internacional de matemáticas, de la ciudad de Heidelberg (Alemania). El autor, un brillante ingeniero llamado; **Ludwig Prandtl (1875 – 1953)**, iniciaba una conspiración para unir a la caprichosa pareja. A raíz de esa conspiración, Prandtl fue invitado a trabajar y colaborar en uno de los ambientes más estimulantes y fértiles, para la investigación de que se tiene memoria. Con ese trabajo, titulado; *“el movimiento de los fluidos con viscosidad pequeña, se iniciaba una profunda revolución de la mecánica de los fluidos”*.



Figura 4.1 Ludwig Prandtl
(1875 – 1953).

Ludwig Prandtl distinguido ingeniero mecánico y catedrático de origen alemán, nació el día 4 de febrero de 1875 en la ciudad de Freising, Baviera

(Alemania). En los primeros años de su vida se educó en compañía de sus padres, poco tiempo después llevó a cabo sus primeros estudios de educación primaria en su ciudad natal. Más tarde ingresó a la universidad (entonces conocida como el Instituto Politécnico de la ciudad de Munich), donde adquirió el conocimiento y la formación como **ingeniero mecánico**, y en el año de 1900, se graduó por parte de esta institución, con una disertación titulada; "*Estabilidad elástica y resistencia de vigas*". Poco tiempo después trabajó en la industria, y más tarde llegó a ser profesor de mecánica, en el Instituto Politécnico de la ciudad de Hannover en 1901. Para el año de 1904, llegó a ser profesor de mecánica aplicada, en la Universidad de Gottingen; puesto que desempeñó por cuarenta y nueve años, hasta el año de su retiro en 1953. Una de sus mejores aportaciones con la que contribuyó al desarrollo y modernización de la mecánica de los fluidos fue; "**el concepto y la introducción de la teoría de la capa límite, en el año de 1904**". Dicha teoría representó la base para la reunificación de dos ciencias (hidráulica e hidrodinámica), que hasta entonces no había podido ser explicada en la teoría de los fluidos. En ese mismo año, publicó en Alemania, uno de sus mejores trabajos, el cual tituló:

"Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung".

Dicho trabajo contenía la mayor parte de sus investigaciones en relación a la teoría de la capa límite. La idea propuesta por Prandtl, sugería que para los regímenes alrededor de las orillas de un fluido, podían ser subdivididos en dos regiones; *una próxima a las paredes, donde los efectos de la viscosidad son muy importantes (capa fina de fluido ó capa límite)*, y *otra adyacente a esta, donde el fluido se comporta como un fluido ideal, y no presenta efectos de fricción interna (viscosidad)*. Figura 4.2. Debido al éxito que tuvieron esta serie de estudios e investigaciones, Ludwig Prandtl es considerado como **el fundador de la mecánica de los fluidos moderna**.

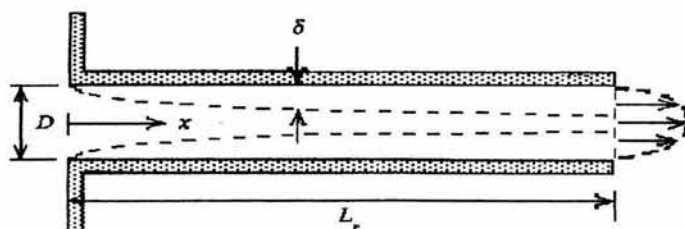


Figura 4.2 Un fluido viscoso que fluye hacia la entrada de un tubo desarrolla su capa límite, en dirección hacia el centro y con el paso del tiempo conduce a un perfil parabólico.

Es muy importante mencionar que el descubrimiento de la capa límite, llevó al entendimiento de la fuerza de arrastre ó de fricción. Esclareciendo en este sentido, cual es la causa principal de las líneas de flujo, que reducen el arrastre de un avión y de otros cuerpos en movimiento. De hecho, otro de los mejores trabajos de Ludwig Prandtl, versaba sobre: la teoría de las alas y las hélices, el cual fue publicado en Berlín en 1961, con el siguiente título:

“Gesammelte Abhandlungen zur angewandten Mechanik, Hydro, und Aerodynamik”.

Dicho trabajo fue llevado a cabo en compañía de; **F. W. Lanchester (1868 – 1945)**, y sirvió para demostrar clara y correcta la teoría del arrastre subsónico ó inducido. Un aspecto que es muy importante mencionar es que la teoría de las alas propuesta por Ludwig Prandtl, al igual que la teoría de la capa límite, sirvieron de gran avance para el desarrollo de la aeronáutica a principios del siglo XX. Algunas otras aportaciones con las que contribuyó este gran científico, para el desarrollo de esta ciencia fueron; las teorías del flujo supersónico. Con los resultados de esta investigación demostró *que las ondas de choque modifican las propiedades aerodinámicas de un cuerpo en movimiento sobre un fluido.*

Para el año de 1910, llevó a cabo una serie de estudios e investigaciones, sobre las teorías de la turbulencia, y con los resultados de esta investigación, dio a conocer la analogía antes enunciada por Reynolds, entre los fenómenos de frotamiento y de transferencia de calor. Dichas investigaciones fueron de gran ayuda en aquel entonces, puesto que con estas se profundizó más sobre el estudio de la capa límite y las teorías del flujo supersónico, enunciando más tarde la ley de las reparticiones sobre la velocidad en la capa límite turbulenta. También contribuyó con el desarrollo y el mejoramiento de los túneles de viento. Posteriormente en 1925, fue nombrado director del Instituto **Káiser Wilhelm**; institución dedicada al desarrollo de la enseñanza de la ingeniería (mecánica de fluidos), y al desarrollo de la investigación hidrodinámica, en compañía de la universidad de Gottingen. De igual forma, también fue Jefe del departamento de investigaciones hidrodinámicas del Instituto Max Planck. Otro de los descubrimientos que también se le acredita a Ludwig Prandtl en mecánica de fluidos, es la invención del **tubo de Prandtl**, dispositivo que mide la velocidad del aire. Dicho dispositivo de medición consiste de dos tubos; uno de Pitot y otro piezométrico. El tubo de Pitot mide la presión total; el tubo piezométrico mide la presión estática, y el tubo de Prandtl, mide la diferencia entre las dos presiones, dando como resultado la presión dinámica.

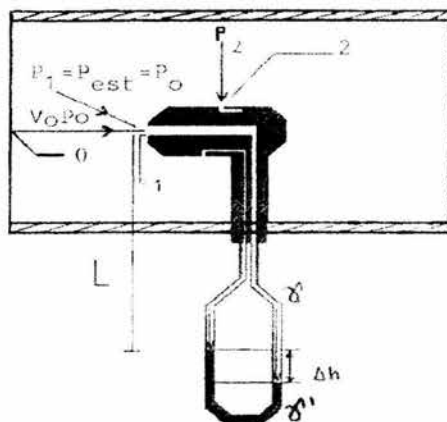


Figura 4.3 Tubo de Prandtl

En la figura 4.3, se ilustra un tubo de Prandtl, introducido en una corriente de fluido, con peso específico (γ), y conectado a un manómetro diferencial, cuyo líquido manométrico tiene un peso específico (γ). Existen numerosas aplicaciones del tubo de Prandtl, por ejemplo; en los laboratorios donde se manejan flujos de gases y de líquidos, y en algunos otros casos para medir la velocidad, y el caudal de los ventiladores, siendo este el instrumento de medición standard para medir la velocidad del aire en aerodinámica, y en honor al científico alemán, a dicho instrumento de medición se le conoce con ese nombre. La ecuación que permite obtener la velocidad en el tubo de Prandtl, es la siguiente:

$$u = C_v \sqrt{2g_c \cdot (\rho - 1) \cdot \Delta h}$$

Donde: u ; es la velocidad de la corriente del fluido

C_v ; es el coeficiente de la velocidad en el tubo de Prandtl

g_c ; es el factor de conversión

ρ ; es el valor de la densidad relativa del líquido

Δh ; es la diferencia de presión en el manómetro diferencial.

En mecánica de fluidos, existe ahora, una ecuación que sirve para calcular la velocidad promedio en tubos lisos, y que es muy útil, para el caso del flujo turbulento, tal es el caso de la ecuación generalizada del perfil universal de velocidades de Prandtl. Dicha ecuación se presenta en tres zonas de flujo:

- a) Una zona pegada a la pared del tubo, en donde el flujo es laminar ($Re < 2100$), y está dada por la siguiente expresión:

$$u^+ = y^+, \text{ para } y^+ \leq 5$$

- b) Una zona de transición:

$$u^+ = -3.05 + 5 \ln y^+, \text{ para } 5 \leq y^+ \leq 30$$

- c) Una zona turbulenta, muy utilizada en flujo de fluidos, para calcular velocidades puntuales:

$$u^+ = 5.5 + 2.5 \ln y^+, \text{ para } y^+ \geq 30$$

Donde: u ; es la velocidad local en la tubería desde la pared del tubo

u^+ ; es el valor de la velocidad friccionante en la tubería

τ_w ; es el esfuerzo cortante en la pared del tubo

y ; es la distancia desde la pared del tubo

y^+ ; es el valor de y , multiplicado por la velocidad friccionante.

La velocidad friccionante, se define de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$u^+ = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$$

En transferencia de calor, existe ahora un número adimensional que lleva el nombre de Prandtl, y en honor al científico alemán, a dicha relación se le conoce con ese nombre. **Número de Prandtl:**

$$P_r = \frac{C_p \cdot \mu}{k}$$

Donde: P_r ; es el número de Prandtl

C_p ; es el calor específico del fluido

μ ; es la viscosidad del fluido

k ; es la conductividad térmica del fluido.

Dicha relación o número adimensional, relaciona un cociente entre las fuerzas de viscosidad en una corriente de fluido, y la conductividad térmica del fluido, a temperatura constante.

Algunos otros estudios que efectuó Ludwig Prandtl, durante los últimos años de su vida, versaban sobre: la analogía de la capa – jabón, para la torsión en secciones no circulares, y con los resultados de este trabajo, publicó más tarde la teoría de la plasticidad. Otra de las teorías que también le interesó fue el estudio de la meteorología dinámica. Un aspecto importante que conviene mencionar, con respecto a la teoría de la capa límite, es que con los resultados de esta investigación, **las ecuaciones de Navier – Stokes**, se reducen a simplificar el problema de estas, lo necesario como para poder resolverlas dentro de la capa límite; aunque fuera de ella, los resultados deben ser igual a los del caso ideal.

Entre algunos de los honores que recibió Ludwig Prandtl, por sus contribuciones a la ciencia, sobresalen: algunos reconocimientos que obtuvo en la universidad de Gottingen, por su brillante carrera en el área de la enseñanza de las matemáticas, la física y la ingeniería, así como algunos otros reconocimientos que obtuvo como Doctor honoris causa por parte del Instituto Politécnico de la ciudad de Zurich y de la Universidad de Praga. Murió el día 15 de agosto de 1953, en la ciudad de Gottingen (Alemania), a sus 78 años de edad.

4.2 EL DIAGRAMA DE MOODY

Otro de los científicos del siglo **XX**, considerado como pionero por sus aportaciones a esta ciencia fue **Lewis Ferry Moody (1880 – 1953)**, distinguido ingeniero hidráulico y proyectista de origen norteamericano. Nació el día 23 de agosto de 1880, en la ciudad de Princenton, Nueva Jersey (U.S.A). En el año de 1922, llevó a cabo una serie de estudios e investigaciones, sobre: el fenómeno de cavitación, que más tarde aplicó al diseño y mejoramiento de las máquinas hidráulicas. Dichas investigaciones fueron de gran ayuda en aquel entonces, ya que con estas, se pudieron realizar muchos avances tecnológicos a principios del siglo XX. Una de sus mejores aportaciones fue; **el desarrollo y la publicación del diagrama de Moody en el año de 1944**. Dicho diagrama es hoy en día, muy utilizado en flujo de fluidos, y permite obtener las pérdidas por fricción en tuberías, siendo el factor de fricción una función del número de Reynolds y de la rugosidad relativa.

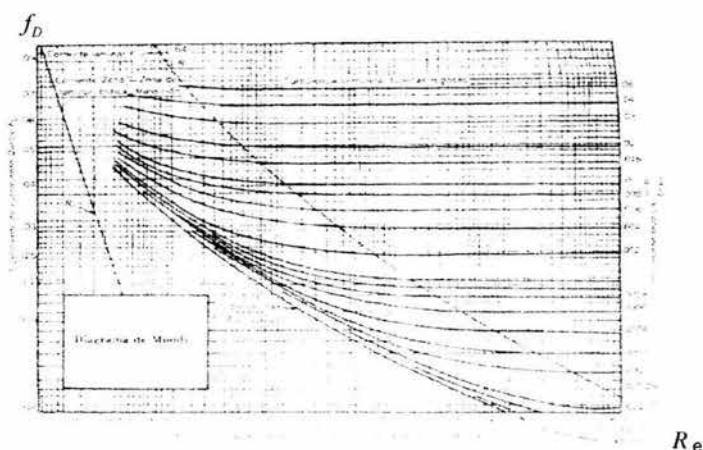


Figura 4.4 Diagrama de Moody publicado en el año de 1944.

En la figura 4.4, se ilustra el famoso diagrama de Moody, el cual fue obtenido en base a algunas experiencias que anteriormente había llevado a cabo el ingeniero Johann Nikuradse, las cuales fueron divulgadas en Alemania en el año de 1933. Como ya se dijo, el factor de fricción Darcy (f_D), es una función que depende del número de Reynolds (Re), y de la rugosidad relativa de la tubería (ε/D):

$$f_D = f(Re, \varepsilon/D)$$

Johann Nikuradse (1894 – 1979), distinguido ingeniero hidráulico y catedrático de origen alemán. Miembro del grupo de investigadores de la universidad de Gotingen, y discípulo de Prandtl. Nació el día 7 de julio de 1894 en la ciudad de Munich (Alemania). Especialista en el campo de resistencias, en particular, sobre: el estudio del régimen de flujo en tuberías. Se le acredita una amplia variedad de experimentos, y un amplio desarrollo sobre el régimen de flujo en tuberías; *lisas y rugosas*.

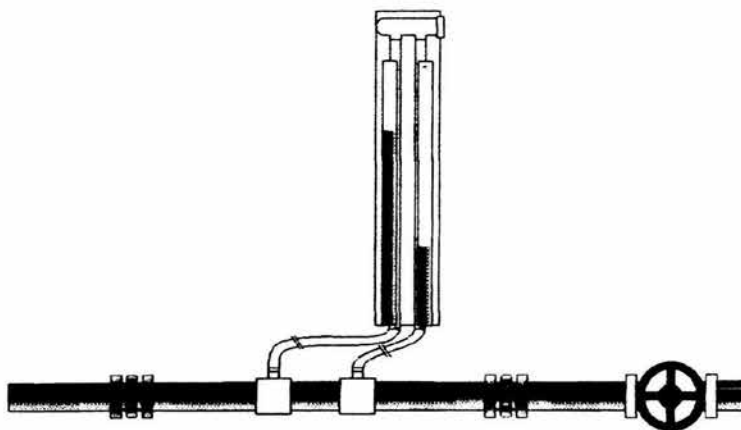


Figura 4.5 Equipo experimental para determinar las características del régimen de flujo en tuberías rugosas.

En la figura 4.5, se ilustra un equipo experimental, muy similar al que utilizó Johann Nikuradse, para determinar las características del régimen de flujo en tuberías rugosas. Cabe mencionar que en este campo de la ciencia, sobresalen dos de sus mejores trabajos. A principios del año de 1932, publicó un trabajo titulado; “Gesetzmassigkeiten der turbulenteu Stromung in glatten Rohren”. Y a mediados del año de 1933, publicó otro de sus mejores trabajos, el cual tituló:

“Stromungs gesetze in rauhen Rohren”

Dicho trabajo fue divulgado en Alemania en ese mismo año, y realmente fue este último, el empleado para la publicación y desarrollo del diagrama de Moody. Uno de los mejores honores que recibió Johann Nikuradse, por sus contribuciones a la ciencia, fue el nombramiento de socio distinguido de la Academia de Ciencias de Berlín en el año de 1933. Murió el día 24 de febrero de 1979, en la ciudad de Munich (Alemania), a sus 85 años de edad.



Figura 4.6 La universidad de Gottingen en Alemania

Algunos otros trabajos, que también sirvieron de base para la publicación y desarrollo del diagrama de Moody, partían del análisis matemático que habían efectuado; **Ludwig Prandtl (1875 - 1953)**, *en compañía de Theodore von Kármán (1881 - 1963)*. Poco tiempo después, debido al éxito que tuvieron estas investigaciones, el ingeniero Lewis Ferry Moody, desarrolló y publicó el famoso diagrama de Moody, tomando como base algunos datos experimentales que el mismo había obtenido por medio de tabulaciones industriales. Así mismo también tomó en cuenta las observaciones del ingeniero **Cyril. F. Colebrook (1910 - 2000)**, y del ingeniero **Cedric. M. White (1898 - 1999)**, dos ingenieros británicos, amigos y colaboradores del grupo de investigación, y catedráticos del grupo de investigación en hidráulica, del Colegio Imperial de la ciudad de Londres - Inglaterra. Uno de los mejores honores que recibió Lewis Ferry Moody, por sus contribuciones a la ciencia, fue el nombramiento de socio distinguido de la Sociedad Americana para el Avance de la Ciencia y la Tecnología. Murió el día 9 de septiembre de 1953, en la ciudad de los Ángeles California (U.S.A), a sus 73 años de edad.

4.3 THEODORE VON KÁRMÁN Y LAS ECUACIONES DE TURBULENCIA.

Uno de los grandes científicos del siglo **XX**, considerado como líder por sus aportaciones a la mecánica de los fluidos fue **Theodore von Kármán (1881 – 1963)**. En el área de los fluidos, se le acreditan un gran número de estudios e investigaciones, sobre: el estudio de la resistencia superficial, la turbulencia y el fenómeno de las estelas.



Figura 4.7 Theodore von Kármán
(1881 – 1963).

Theodore von Kármán distinguido ingeniero mecánico y catedrático de origen húngaro, nació el día 11 de mayo de 1881 en la ciudad de Budapest (Hungría). En los primeros años de su vida se educó en compañía de sus padres, poco tiempo después llevó a cabo sus primeros estudios de educación primaria en su ciudad natal. Más tarde ingresó a la universidad de Budapest, donde adquirió el conocimiento y la formación como ingeniero mecánico, y en el año de 1902, se graduó por parte de esta institución. Durante el periodo comprendido entre 1903 y 1906, trabajó en dicha universidad dando clases de ingeniería, y más tarde realizó estudios de doctorado en la universidad de Gottingen, donde tuvo por maestro a **Ludwig Prandtl (1875 – 1953)**. Uno de los mejores catedráticos de la época, quien le enseñó a hacer análisis de ingeniería. En dicha universidad mostró su talento por la investigación, debido a que respondió a muchas de las enseñanzas de sus maestros, en particular por *el estudio de la aeronáutica y las matemáticas*. Otro de sus mejores maestros

fue **Felix Christian Klein (1849 – 1925)**, un eminente matemático de origen alemán, quién acentuó el pleno uso de las matemáticas y de las ciencias básicas en sus diseños, para aumentar la eficiencia tecnológica de los equipos. En el año de 1911, Theodore von Kármán comenzó a elaborar uno de sus mejores trabajos, sobre las teorías de la turbulencia, el cual concernía sobre el análisis de la doble fila que se alternaba en los vórtices ó remolinos, detrás de un cuerpo plano, cuya corriente de fluido es ahora mejor conocida con el nombre de **línea del vórtice de Kármán**. Algunos de los mejores trabajos de Kármán, versaban sobre **las teorías de las turbulencias y la teoría de la capa límite**. Entre otras aportaciones para el desarrollo de esta ciencia, también se le acredita un amplio desarrollo en el campo de la investigación **aerodinámica a principios del siglo XX**. Para el año de 1912, fue nombrado profesor y director del Instituto Aeronáutico de la ciudad de Aquisgrán en Alemania; puesto que desempeñó hasta el año de 1930.

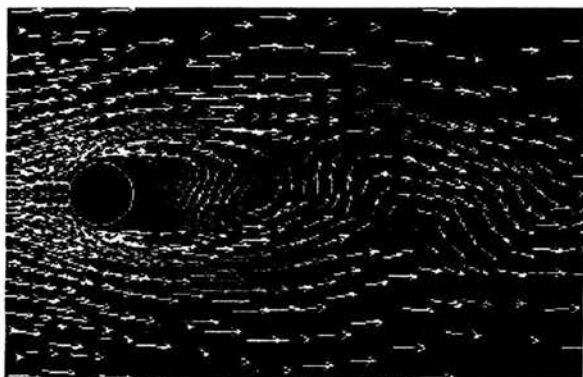


Figura 4.8 Vórtices ó remolinos de Kármán.

En la figura 4.8, se ilustra la línea de remolinos ó vórtices de Kármán, siendo esta la línea de turbulencias que se forman detrás de un cuerpo plano, y que se desplaza en una corriente de fluido; *se resuelven periódicamente con un giro contrario ó son causa de la pérdida de energía del cuerpo que se desplaza*. Años más tarde, durante la primera guerra mundial, von Kármán fue llamado al servicio militar del imperio Austrohúngaro, y poco tiempo después, llegó a ser la cabeza principal de la investigación en el área relacionada con la fuerza aérea, durante el desarrollo de los primeros helicópteros. A finales de la primera guerra mundial, muchos de los estudiantes de von Kármán, fueron atraídos por la atmósfera intelectual y social que este gran científico había creado, y como resultado de estos hechos pudo restablecer contactos y amistades rotas por la guerra.

Para el año de 1922, participó en un congreso internacional sobre **hidrodinámica y aerodinámica**, en el instituto Innsbruck de la ciudad de Austria. Dicho congreso fue de gran ayuda para la formación del Comité Internacional de Mecánica Aplicada, el cual continúa organizando congresos hasta hoy en día. En el año de 1946, dicha organización llegó a ser mejor conocida como *Unión Internacional de Mecánica Teórica y Aplicada*, y en ese mismo año, esta organización designó a Kármán como presidente honorario de esta sociedad. A principios del año de 1920, comenzó a viajar extensamente alrededor de toda Europa, y como resultado de estos viajes, empezó a trabajar como conferencista y consultor de la industria. Poco tiempo después, efectuó su primera visita a los Estados Unidos en el año de 1926, la cuál sirvió para aconsejar sobre como era posible establecer una nueva institución dedicada a la enseñanza de la aeronáutica (**Instituto Tecnológico de Aeronáutica**), en la ciudad de los Ángeles California. Dicha institución fue apoyada por la compañía Douglas, cuya labor era el diseño de aeronaves, y que hoy en día recibe el nombre de **Boeing**. Cuatro años mas tarde, a mediados del año de 1930, von Kármán, regresó para asumir la dirección de esta institución (I. T. A), y con su llegada, el laboratorio aeronáutico de esta institución, llegó a ser nuevamente una meca del mundo de las ciencias aeronáuticas. Mas tarde se convirtió en uno de los fundadores del Instituto Aeronáutico de Ciencias, y poco tiempo después, llegó a ser uno de los mejores consultores, para toda la industria americana y del gobierno.

Su principal obra científica se centró en el desarrolló de algunas áreas de esta ciencia, entre estas: **la mecánica de los fluidos, la teoría de la turbulencia, la propulsión a chorro, el vuelo supersónico, la aplicación de las matemáticas a la ingeniería, el diseño de aeronaves y la erosión del viento sobre el suelo**. A finales del año de 1930, Theodore Von Kármán estableció una fórmula teórica, la cual relaciona los valores del factor de fricción; f , y del número de Reynolds; R_e , para tubos lisos. Esta ecuación es válida para tuberías lisas y para cualquier valor del número de Reynolds; R_e , comprendido entre el valor de; $R_e > 100.000$. Dicha ecuación es teóricamente correcta y sus resultados han sido comprobados experimentalmente. **Primera ecuación de Kármán:**

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log(R_e \sqrt{f}) - 0.8$$

Para el caso de tuberías rugosas que funcionan en la zona de mayor turbulencia, Theodore von Kármán, dedujo otra ecuación en compañía del ingeniero; J. Nikuradse (1894 – 1979). **Segunda ecuación de Kármán:**

$$\frac{1}{f} = 1.74 + 2 \log \frac{D}{2\varepsilon}$$

La ecuación anterior relaciona los valores del factor de fricción; f , para el caso de tuberías rugosas, cuyos valores obtenidos por esta última son mayores que aquellos que serían obtenidos por la *Primera ecuación de Kármán*. Es muy importante mencionar que la ecuación anterior; *Segunda ecuación de Kármán*, no incluye el número de Reynolds, y por lo tanto, para una determinada tubería con un cierto diámetro; D , el valor de f , sólo dependerá de la rugosidad. Ahora para el caso de la región comprendida entre las condiciones precedentes ecuaciones primera y segunda de Kármán, esto es, para el caso de tubos lisos y de la zona de mayor turbulencia, **Cyril. F. Colebrook (1910 – 2000)**, propuso en el año de **1938**, una ecuación semi – empírica (no lineal), en compañía de; **Cedric. M. White (1898 – 1999)**, dos ingenieros británicos, amigos y colaboradores del grupo de investigación. **Ecuación de Colebrook – White:**

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\varepsilon}{3.71D} + \frac{2.51}{R_e \sqrt{f}} \right]$$

Dicha ecuación es válida para valores del coeficiente de rozamiento, entre el rango de; $R_e \sqrt{f} > 400$. La ecuación de Colebrook - White, fue desarrollada a partir de los estudios e investigaciones que anteriormente habían efectuado Ludwig Prandtl en compañía de Theodore von Kármán. Para el caso del régimen laminar, existe otra ecuación que es de gran utilidad para determinar los valores del coeficiente de rozamiento, y es aceptable dentro del siguiente rango, $R_e \sqrt{f} < 400$. **Tercera ecuación de Kármán:**

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{R_e \sqrt{f}}{64}$$

En la siguiente figura, se ilustra el ahora conocido como diagrama de Kármán, el cual relaciona los valores del coeficiente de frotamiento, en función del número de Kármán, para el caso de tuberías lisas, y relaciona los valores para el caso del régimen; *laminar y turbulento*.

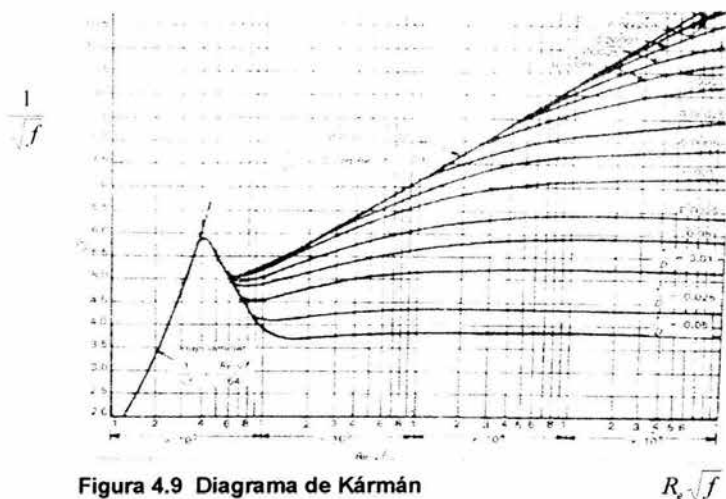


Figura 4.9 Diagrama de Kármán

Este diagrama es muy útil para la resolución de redes de tuberías en flujo de fluidos, y se emplea para resolver redes de conducción en paralelo, en las que puede establecerse el sentido del flujo, y también se emplea para redes ramificadas (redes abiertas). Además permite encontrar las velocidades (u), en las líneas de flujo, cuando se conocen las pérdidas por fricción en la tubería. Es muy importante mencionar que el diagrama de Kármán, es el inverso del diagrama de Moody (véase biografía de Lewis Ferry Moody).

Las siguientes expresiones relacionan el ahora conocido como coeficiente de frotamiento y número de Kármán, los cuales se definen como:

$$\frac{1}{f} = \frac{u}{\sqrt{2g_c \cdot \left(\frac{D}{L}\right) \cdot \frac{\Sigma F}{M}}} \quad \text{Re} \sqrt{f} = \frac{D \cdot \rho}{\mu} \sqrt{2g_c \cdot \left(\frac{D}{L}\right) \cdot \frac{\Sigma F}{M}}$$

Donde: u ; es la velocidad en la línea de flujo

D ; es el diámetro de la tubería

L ; es la longitud de la tubería

ρ ; es la densidad del fluido

μ ; es la viscosidad del fluido

g_c ; es el factor de conversión.

La aplicación más importante del diagrama de Kármán, para resolver un problema (de redes de tuberías), en flujo de fluidos, se muestra de acuerdo con el siguiente procedimiento. Se calculan primero las pérdidas por fricción en la tubería, posteriormente se procede a calcular el valor numérico del número de Kármán, y del coeficiente de frotamiento. Una vez calculados estos valores se calcula el valor de la velocidad en la línea de flujo:

$$\frac{\Sigma F}{M} \rightarrow \text{Re} \sqrt{f} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} \rightarrow u$$

A principios del año de 1936, Theodore von Kármán se refugió en los Estados Unidos, donde adquirió la nacionalidad norteamericana en ese mismo año, y poco tiempo después, destacó con algunos de sus mejores trabajos sobre las teorías del vuelo, en particular sobre *el desarrollo de los modernos cohetes y del helicóptero*. En ese mismo año, von Kármán inicia el Laboratorio Aeronáutico Guggenheim, en el Instituto de Tecnología de California; el laboratorio luego se convertiría en el **JPL (Jet Propulsion Laboratory)**. Por esa misma época, comenzó a publicar otros de sus mejores trabajos, en particular sobre las teorías del flujo supersónico a velocidades **subsónicas, sónicas y supersónicas**.

A finales del año de 1936, a pesar del desacuerdo que existía entre un grupo de académicos e investigadores, llevó a cabo uno de sus mejores proyectos sobre las teorías del vuelo, en particular sobre **la propulsión del cohete Rogers (el primer cohete dirigitado)**. Y sirvió para apoyar el interés entre un grupo de investigadores y estudiantes sobre el tema.

Para el año de 1938, llegó a ser miembro de la Academia Nacional de Ciencias, en donde trabajó como consultor, sobre el desarrollo de los modernos cohetes para el ejército militar. En el año de 1941, von Kármán participó en la fundación del Aerojet General, siendo este uno de los primeros productos americanos, fabricados a partir de un sólido y de un líquido, y también considerado como el primer propulsor lanza motores. ***Es muy importante mencionar que en el año de 1944, Theodore von Kármán, participó como uno de los primeros socios cofundadores de la NASA,*** y como resultado de estos hechos, a mediados del siglo XX, este gran científico apoyó la idea sobre la cooperación que existía entre un grupo de ingenieros aeronáuticos, miembros de una organización perteneciente al tratado de las naciones unidas del Norte del Atlántico. Pocos meses después, como resultado de estos hechos, von Kármán obtuvo la aprobación para efectuar este proyecto en compañía del Grupo Advisory Group for Aeronautical Research and Development (**AGARD**). Una de las mejores sociedades de la época sobre el desarrollo de la Investigación Aeronáutica, y de la cual fue presidente Theodore von Kármán hasta el año de 1963.

En el área de la enseñanza sobresalen 177 obras que él mismo escribió las cuales fueron de gran ayuda para educar varias generaciones de científicos. Para el año de 1956, von Kármán tomó lugar como socio distinguido del Consejo Internacional de las Ciencias Aeronáuticas (**ICAS**), y en 1960, de la Academia Internacional de Astronáutica. Finalmente durante los últimos años de su vida von Kármán, se asoció de nuevo con el Instituto Aeronáutico de la ciudad de Aquisgrán en Alemania, en donde pasaría los últimos años de su vida. En cuanto a su personalidad Theodore von Kármán fue una persona; *amigable, ingeniosa y poliglota*, quién además pertenecía a un numeroso círculo de científicos, amigos y de relaciones públicas. Kármán recibió en vida, una cincuenta de premios y galardones de gran prestigio, pero en particular uno de los mejores honores que recibió, por sus contribuciones a la ciencia fue ***la Primera Medalla Nacional de Ciencia y Tecnología, a principios del año de 1963, de manos del Presidente; John F. Kennedy (1917 – 1963).*** En las palabras del Presidente Kennedy dice al respecto:

“I Know of one else who so completely represents all the areas involved in this medal – science, engineering and education”.

En ese mismo año, también recibió por parte del presidente Kennedy su autobiografía ***The Wind and Beyond*** (editada en cinco volúmenes diferentes).

En la siguiente figura, se puede apreciar una fotografía, donde el Presidente John F. Kennedy le otorgó la Primera Medalla Nacional de Ciencia y Tecnología, a Theodore von Kármán, el día 18 de febrero de 1963, en la Casa Blanca de los Estados Unidos Americanos.



Figura 4.10 El Presidente John F. Kennedy otorgando la Medalla Nacional de Ciencia y Tecnología a Theodore von Kármán, el día 18 de febrero de 1963.

Finalmente el gran científico y líder del siglo XX, Theodore von Kármán. Murió el día 7 de mayo de 1963, en la ciudad de Aquisgrán (Alemania), a sus 82 años de edad.

4.4 PAUL RICHARD HEINRICH BLASIUS Y SUS APORTACIONES A LA MECÁNICA DE LOS FLUIDOS.

Por esa época, otro de los científicos que también hizo contribuciones a la mecánica de los fluidos fue **Paul Richard Heinrich Blasius (1883 – 1970)**. Considerado como uno de los primeros estudiantes de Prandtl, y el primero en proporcionar una solución analítica, a las ecuaciones de la capa límite. También se le acredita un gran número de estudios e investigaciones sobre la resistencia que presentan los fluidos, ya que demostró que la resistencia en tuberías lisas, está directamente relacionada con el número de Reynolds.



Figura 4.11 Paul Richard Heinrich Blasius (1883 – 1970)

Paul Richard Heinrich Blasius distinguido ingeniero y catedrático de origen alemán, nació el día 23 de noviembre de 1883 en la ciudad de Berlín (Alemania). En el campo de la investigación, su principal área de interés fue el estudio de las resistencias, en relación al régimen de los fluidos. Cabe mencionar que en este campo de la ciencia, se le acreditan un gran número de trabajos analíticos sobre el estudio de las velocidades, y las resistencias en los límites del régimen laminar. En el año de 1908, publicó uno de sus mejores trabajos, el cual tituló:

“Grenzschichten in Flüssigkeiten mit kleiner Reibung”.

Dicho trabajo contenía la mayor parte de sus investigaciones, en relación con; una solución analítica para la distribución de las velocidades, y las resistencias en la capa límite laminar. Y fue de gran ayuda para el desarrollo de la mecánica de los fluidos, puesto que logró cuantificar, la teoría cualitativa propuesta por Prandtl en el año de 1904. La verificación experimental, de este experimento, la efectuó utilizando el régimen isotérmico de un gas, como gradiente nulo de presión sobre la superficie de una placa. Para el año de 1911, publicó otro de sus mejores trabajos, el cual tituló:

“Das Aehnlichkeitsgesetz bei Reibungsvorgängen in Flüssigkeiten”.

Dicho trabajo fue de gran ayuda en el desarrollo de esta ciencia, ya que logró demostrar que ***la resistencia al flujo a través de tubos lisos, puede expresarse en términos del número de Reynolds para el régimen laminar y turbulento.*** También se le acredita el primer diagrama para la determinación del coeficiente de resistencia, en el límite laminar, siendo éste una función del número de Reynolds. Para el caso de tuberías lisas, Blasius demostró la siguiente relación:

$$f_D = \frac{0.320}{R_e^{0.25}}$$

Dicha ecuación es válida para el régimen turbulento en tuberías lisas, y es aceptable dentro del siguiente rango de valores; $2100 < R_e < 100,000$. De esta forma, como las tuberías son lisas, el factor de fricción f_D , no es una función de la rugosidad relativa, y por lo tanto, el valor de la rugosidad relativa, en este caso es nulo ($\epsilon/D = 0$). En otras palabras el valor que se tiene para el factor de fricción en tuberías lisas, es una función del número de Reynolds. Algunas otras aportaciones de Blasius para el desarrollo de esta ciencia fueron: *la formulación de los principios básicos sobre el funcionamiento de las alas y las hélices.* Dichos principios los llevó a cabo en compañía de su maestro Ludwig Prandtl en el año de 1905, y sirvieron de base para el desarrollo de *la aerodinámica.* Puesto que en aquella época, el diseño de aeronaves (aviones), requería de un alto grado de compresión sobre *la fluidez de los fluidos.* También contribuyó con el desarrollo del diagrama de Moody, en compañía de Kármán y Prandtl. Uno de los mejores honores que recibió Paul Richard Heinrich Blasius, por sus contribuciones a la ciencia, fue el nombramiento de socio distinguido de la Academia de Ciencias de Berlín en el año de 1913. Murió el día 25 de febrero de 1970, en la ciudad de Munich (Alemania), a sus 87 años de edad.

4.5 LA LEY DE KOLMOGOROV

Lewis Fry Richardson (1881 – 1953), uno de los pioneros de la meteorología moderna y miembro representativo de la tradición científica inglesa, estudió la dinámica atmosférica, y desde luego, se enfrentó con el problema de la turbulencia, siempre presente en su monumental laboratorio de la atmósfera. En un poema sencillo, que todavía se cita en los textos, resumió las mismas ideas que Leonardo da Vinci, plasmó en sus lienzos al observar el fluir de las aguas, y lo que los científicos creen que sucede con un fluido excitado:

***Vórtices grandes tienen vórtices más chicos,
nutridos por su velocidad.
Vórtices chicos tienen vórtices más chicos,
así hasta la viscosidad
(en el sentido molecular).***

El contenido del verso anterior, expresa el proceso que parece sufrir la energía, y que se le comunica a un fluido para mantenerlo en estado turbulento, el llamado modelo de la ***cascada de la energía***. Un ejemplo de esto se ilustra cuando tenemos un tanque con agua, al que agitamos con una paleta de cierto tamaño. Al mover la paleta se producen vórtices de la misma escala. Entonces observamos que estos vórtices migran y se desintegran, generándose en el proceso otros vórtices de escala menor. Este mecanismo continúa de una escala a otra, hasta que la escala es lo suficientemente pequeña como para que el movimiento de los vorticillos resultantes sea dominado por los efectos de la fricción interna del fluido ***la viscosidad***. Ahí, los pequeños remolinos comienzan una etapa de decaimiento, disipándose hasta desaparecer; la longitud típica de esta escala es de fracciones de milímetro.

De acuerdo con estas ideas, la energía pasa de una escala a otra, como en una cascada, en la que el agua cae de un cierto nivel a otro, perdiendo altura (energía potencial), pero ganado movimiento (energía cinética). En el fondo de las escalas el movimiento se convierte en calor, disipándose la energía, y queda el fluido en reposo. En la medida en que se siga agitando la paleta (inyectando energía al fluido), se podrían apreciar las estructuras en las distintas escalas, siendo la más pequeña, la más difícil de ver. Por consiguiente el estudio de la dinámica de vórtices, es uno de los temas más importantes en el estudio de la turbulencia. El objetivo de todo esto, es entender cómo se generan, como interactúan entre sí, cómo se rompen, y finalmente cómo

decaen. Algunas de las teorías más comunes, abordan estos problemas, desde diversos puntos de vista, tratando de encontrar cantidades que se conserven en el proceso, y estudiando la forma en que van cambiando otras, al pasar a través de distintas escalas. Uno de los resultados más célebres sobre la teoría de la turbulencia, se le debe a **Andrei Nikoláievich Kolmogorov (1903 – 1987)**, sobresaliente por sus estudios e investigaciones en el área de los fluidos.



Figura 4.12 Andrei Nikoláievich Kolmogorov (1903 – 1987).

Andrei Nikoláievich Kolmogorov distinguido matemático y físico de origen soviético, nació el día 25 de abril de 1903 en la ciudad de Tambov (Rusia). Fue profesor de matemáticas en la Universidad Estatal de Moscú. Sus trabajos más importantes influyeron notablemente en diversas ramas de la matemática moderna. Desarrolló una formulación axiomática sobre la teoría de la probabilidad, y sentó las bases de la teoría general de los procesos de Markov; además, fue uno de los fundadores de la teoría de los procesos estocásticos. También realizó importantes aportaciones a la teoría de los sistemas dinámicos. **En el año de 1941, propuso una teoría sobre el estudio de la turbulencia, la cual ha llegado a ser de gran utilidad para el desarrollo de esta ciencia.** Dicha teoría representa uno de los pocos resultados más generales y de característica cuantitativa, puesto que es válida para todo tipo de flujo turbulento; *isotrópico y homogéneo*. Si la turbulencia es homogénea, significa que se ve igual, al trasladamos en distintos puntos del fluido; que sea

isotrópica, significa que parece igual, si se observa en cualquier dirección. Para que lo anterior sea cierto (aproximadamente), se requiere que la región en estudio (sistema), se encuentre lejos de objetos ó de las paredes que contienen al fluido; se dice entonces que la turbulencia es localmente isotrópica. Esta simplificación fue introducida por **Geoffrey Ingram Taylor (1886 – 1975)**, en el año de 1936.

La ley de los dos tercios de Kolmogorov, afirma lo siguiente; en un flujo turbulento, la autocorrelación de velocidades entre dos puntos separados, por una distancia l , dentro del subintervalo inercial, es igual a:

$$C(\epsilon \cdot l)^{2/3}$$

Donde: C ; es una constante numérica universal

ϵ ; es el flujo promedio de la energía por unidad de masa

l ; es la distancia entre dos puntos.

En la expresión anterior todo indica que para entender el enunciado harían falta serios estudios de investigación (paleología), y realmente no es así, es suficiente con algo de física y de matemáticas. Con estas ideas en mente, Kolmogorov introduce su primera hipótesis. Propone la existencia de un intervalo de escalas en el que el comportamiento turbulento es universal. Es decir, el flujo turbulento es homogéneo, isotrópico y estacionario. Este último atributo indica que en promedio, el estado no cambia con el tiempo; además, nos asegura (en forma abstracta), que en este intervalo las cosas no pueden depender más que dos parámetros; el flujo de energía (ϵ) que se le inyecta al flujo para mantenerlo agitado (la energía necesaria para llevar a cabo el proceso), y la viscosidad (μ), que caracteriza a la disipación de la energía (el calentamiento del fluido). Hecha esta suposición Kolmogorov, recurre a algo más ingenioso. **Estima el tamaño de la escala máxima para la cual los efectos de la fricción todavía desempeñan un papel.** Al efecto demuestra que sólo hay una manera de combinar los dos parámetros (ϵ) y (μ), para que formen una longitud, en forma simple recurrió al uso de la expresión:

$$(\epsilon)^{1/4} \cdot (\mu)^{3/4}$$

La expresión anterior representa el tamaño de la escala, y en honor a Kolmogorov recibe ese nombre, y es comúnmente denotada por (η). De esta forma, Kolmogorov, postuló un enunciado el cual dice: a escalas mayores que (η), no hay disipación, por lo que la viscosidad debe ser una cantidad irrelevante. De esta manera, existe una zona de escalas (**subintervalo**), en la que (μ), debe desaparecer y quedar solamente (ϵ), como el único parámetro más importante. La energía inyectada para mantener la turbulencia se va transfiriendo a escalas cada vez más chicas, hasta desaparecer. Sigue pasando a escalas todavía más pequeñas, hasta que la viscosidad aparece en escena, iniciando su destructivo papel hasta el final. Como la energía sólo transita por estas escalas intermedias, al subintervalo se le denomina; **inercial. ¡como de paso!**

Así, en la traducción de la ley los dos tercios, se aclara un poco más lo de subintervalo inercial, y el significado de (ϵ). En conclusión en un flujo turbulento, la velocidad de cambio (fluctúa), en el tiempo y en el espacio. Es importante mencionar que los flujos turbulentos no se pueden evaluar exclusivamente a partir de las predicciones calculadas, y su análisis depende de una combinación de datos experimentales y modelos matemáticos; gran parte de la investigación moderna en mecánica de fluidos esta dedicada a una mejor formulación de la turbulencia. Finalmente la turbulencia, es el último problema por resolver de la física clásica.

Entre algunos de los honores que recibió el doctor Adrei Nikoláievich Kolmogorov por sus contribuciones a la ciencia, sobresalen: algunos reconocimientos que obtuvo en la Universidad Estatal de Moscú, por su brillante carrera en el área de la enseñanza de las matemáticas y la física. De igual forma en el año de 1939, fue nombrado socio distinguido de la Academia de Ciencias de la UR.SS, y en 1941, fue galardonado con el Primer Premio Nacional de Ciencia. También fue miembro de distinguidas sociedades y academias, entre estas la Academia Nacional de Ciencias de Alemania, la Academia Americana de Artes y Ciencias, la Sociedad Matemática de Londres, el Instituto de Ciencias Estadísticas de la India, *la Real Sociedad de Londres* (1964), y la Academia Nacional de Estados Unidos. Murió el día 20 de octubre de 1987, en Moscú (Rusia), a sus 84 años de edad.

Geoffrey Ingram Taylor (1886 – 1975), distinguido matemático y físico de origen inglés, nació el día 7 de marzo de 1886, en la ciudad de St John Wood, Londres (Inglaterra). Estudió en la universidad de Cambridge (Trinity College), y más tarde fue nombrado, profesor de física de esta universidad, durante el

periodo comprendido entre 1923 y 1952. En el año de 1911, inició su carrera científica como meteorologista, y poco tiempo después, sobresalió por sus estudios e investigaciones en el área de los fluidos.



Figura 4.13 Geoffrey Ingram Taylor
(1886 – 1975).

En este campo de la ciencia algunos de los problemas que abordó fueron los siguientes el movimiento de los fluidos, la oceanografía y la aerodinámica. Uno de sus mejores trabajos fue una obra titulada:

“Turbulent motion in fluids”.

Dicha obra fue publicada en el año de 1911. En 1915, empezó a trabajar como investigador, y poco tiempo después comenzó a extender sus investigaciones para incluir problemas sobre el estudio de los remolinos en la atmósfera, y con el resultado de estas investigaciones, publicó una serie de estudios, los cuales concernían sobre: el análisis de la turbulencia de los fluidos, como resultado de utilizar métodos estadísticos. Dicha teoría representó el primer análisis por difusión, a través de movimientos continuos; además, fue considerada, como el siguiente avance, a partir de los conceptos y teorías establecidas por *Prandtl* y *Kármán*. Algunos otros problemas que abordó Taylor versaban sobre: el movimiento de los cuerpos que pasaban a través de un

fluido rotatorio. De igual forma, también realizó importantes aportaciones al desarrollo de la hidrodinámica, la mecánica de sólidos y la cristalografía. Finalmente cabe mencionar, que muchas de las ideas fundamentales en la dinámica de los fluidos moderna, fueron propuestas por Taylor, en los profundos trabajos que hizo, a lo largo de su prolifera carrera científica.

Entre algunos de los honores que recibió Sir Geoffrey Ingram Taylor por sus contribuciones a la ciencia, sobresalen: algunos reconocimientos que obtuvo en la universidad de Cambridge, por su brillante carrera en el área de la enseñanza de las matemáticas, la física y la ingeniería (mecánica y química). Cabe mencionar que en el año de 1923, fue nombrado socio distinguido del grupo de profesores en investigación, por parte de la Real Sociedad. De igual forma en el año de 1919, fue nombrado socio distinguido de la Real Sociedad de Londres, y en 1933, recibió la Medalla Real. Así mismo en 1944, fue nombrado Caballero por la Reina Ana de Inglaterra, y en 1969, recibió una orden de mérito por sus contribuciones a la ciencia. También fue miembro de distinguidas sociedades y academias, entre estas la Academia Nacional de Estados Unidos, la Academia de Ciencias de Francia y la Academia de Ciencias de la UR.SS. Murió el día 27 de junio de 1975, en la ciudad de Cambridge (Inglaterra), a sus 89 años de edad.

4.6 HUNTER ROUSE Y SUS APORTACIONES AL DESARROLLO HISTÓRICO DE LA HIDRÁULICA.

Otro de los científicos del siglo XX, que también hizo contribuciones al desarrollo de esta ciencia fue **Hunter Rouse (1906 – 1996)**. Considerado como uno de los investigadores más importantes de ese siglo, por sus brillantes aportaciones en el campo de la hidráulica, y de la mecánica de los fluidos; especialmente en el transporte de sedimentos (transporte hidráulico), y en el desarrollo histórico de la hidráulica, a nivel mundial.



Figura 4.14 Hunter Rouse
(1906 – 1996)

Hunter Rouse distinguido ingeniero hidráulico y catedrático de origen norteamericano, nació el día 13 de febrero de 1906 en la ciudad de Toledo, Ohio (U.S.A). Fue profesor de hidráulica y de ingeniería (mecánica de fluidos), en el Instituto de Investigaciones Hidráulicas de la Universidad de Iowa; College of Engineering. Durante su estancia como profesor en dicha universidad, elaboró una gran cantidad de libros (material didáctico), para apoyar el desarrollo de la enseñanza de la ingeniería en mecánica de fluidos, tal es el caso de algunos libros famosos y antiguos, que el mismo escribió y publicó. El primero de ellos fue publicado en el año de 1961, con el siguiente título:

“Laboratory Instruction in the Mechanics of Fluids”.

Y el segundo libro, fue publicado en el año de 1979, con el siguiente título; **"Elementary Mechanics of Fluids"**. De igual forma, también elaboró una gran cantidad de material videográfico, el cual fue traducido y grabado, en distintos idiomas, tales como: *portugués, inglés y francés*. Ese material, fue de gran ayuda para el desarrollo de la enseñanza de la ingeniería (mecánica de fluidos); además, fue distribuido directamente por la universidad de Iowa en forma de videocasetes NTSC, el cual incluía; varios textos didácticos, una narrativa del filme, así como fórmulas, figuras y otros elementos relacionados con el tema.

Durante el trayecto de su carrera científica del ingeniero Hunter Rouse, como profesor de ingeniería, en el Instituto de Investigaciones Hidráulicas, de la universidad de Iowa, elaboró una de las mejores colecciones sobre el desarrollo histórico de la hidráulica, a nivel mundial, y es comúnmente conocida como:

"History of Hydraulics".

Dicha colección está constituida por más de 500 volúmenes, que narran especialmente sobre los últimos 2000 años de la historia de la hidráulica. Una de esas colecciones incluye reimpressiones y publicaciones originales, tal es el caso de la obra publicada por *Simon Ince* (1925 - 1995), en el año de 1963. Así mismo, también sobresale otra obra del ingeniero Hunter Rouse, cuyo título es; **"Hydraulics in the United States"**. Dicha obra fue publicada en los Estados Unidos de Norteamérica en 1976, y fue de gran ayuda en el desarrollo de esta ciencia de los fluidos; pues trataba de algunas otras investigaciones y avances relacionados con la historia de la hidráulica. Actualmente existe una colección especial, sobre la historia de la hidráulica; **Hydraulics Collection**, y está disponible por Internet. Dicha colección fue elaborada por Hunter Rouse en el año de 1983, y titulada como:

"Highlights in the History of Hydraulics".

Algunas otras aportaciones del ingeniero Hunter Rouse, para el desarrollo de esta ciencia de los fluidos, fueron: el desarrollo y la publicación de algunos diagramas famosos como el de *Shields - Rouse Diagram* (1939), el cual es muy útil para el transporte de sedimentos. Así mismo, también se le acredita el desarrollo y la publicación de otro diagrama, comúnmente conocido como *Rouse - Diagram* (1942), de gran utilidad para cálculos relativos del régimen de flujo, en flujo de fluidos. Cabe mencionar que éste último diagrama, fue de gran utilidad para el desarrollo del diagrama de *Moody* (1944); el que es muy útil en flujo de fluidos, pues permite obtener las pérdidas por fricción en tuberías.

En la siguiente figura, se puede apreciar una fotografía, del Instituto de Investigaciones Hidráulicas de la Universidad de Iowa.



Figura 4.15 El Instituto de Investigaciones Hidráulicas de la Universidad de Iowa (College of Engineering).

Entre algunos de los honores que recibió el doctor Hunter Rouse por sus contribuciones a la ciencia, sobresalen: algunos reconocimientos que obtuvo en la Universidad de Iowa, por su brillante carrera en el área de la enseñanza de la ingeniería (mecánica de fluidos), así como la elección de miembro de distinguidas sociedades y academias, entre estas: la Academia Nacional de Estados Unidos, y la Sociedad Americana para el Avance de la Ciencia y la Tecnología. De igual forma en el año de 1979, la Universidad de Iowa, le otorgó el Primer Premio Nacional de Ciencia y Tecnología, por sus brillantes contribuciones en el área de la investigación y la docencia. Murió el día 20 de junio de 1996, en la ciudad del Sol Arizona (U.S.A), a sus 90 años de edad.

4.7 ROBERT BYRON BIRD Y SUS APORTACIONES A LA DINÁMICA DE LOS FLUIDOS.

Otro de los científicos del siglo **XX**, que también es considerado importante por sus aportaciones a esta ciencia es; **Robert Byron Bird**, nacido en el año de 1924. En el área de los fluidos, se le acreditan un gran número de estudios e investigaciones, sobre: el estudio de la reología, los polímeros y los fenómenos de transporte.



Figura 4.16 Robert Byron Bird
(1924)

Robert Byron Bird distinguido ingeniero químico y catedrático de origen estadounidense, nació el día 5 de febrero de 1924 en la ciudad de Bryan Texas (U.S.A). En los primeros años de su vida se educó en compañía de sus padres, poco tiempo después llevó a cabo sus primeros estudios de educación primaria en su ciudad natal. Mas tarde realizó sus estudios de educación universitaria en la universidad de Maryland (College Park), en donde obtuvo el grado de ingeniero químico, por parte de esta institución, en el año de 1943. Después de haber completado dichos estudios, decidió continuar estudiando, y para el año de 1947, obtuvo el grado de maestro en ingeniería química, por parte de la universidad de Illones cerca de Urbana, Champaign. Posteriormente realizó estudios de doctorado (físicoquímica), en la universidad de Wisconsin, Madison en el año de 1950. Un año mas tarde, estudio un Postdoctorado en el Instituto; Voor Theoretische Física, Universiteit van Ámsterdam (1951).

En el campo de la investigación y la docencia, algunas áreas de su interés son; **los fenómenos de transporte, la teoría cinética de los polímeros, el estudio de la reología y la dinámica de los fluidos para el caso de los polímeros.** Es muy importante mencionar que por la gran cantidad de intereses que ha tenido el Doctor; Byron Bird, ha publicado *10 libros y 25 artículos*, que el mismo ha escrito sobre diversos temas de ingeniería, los cuales han sido de gran utilidad para educar varias generaciones de científicos. En la siguiente figura, se ilustra la portada de uno de los libros que ha publicado el Doctor Robert Byron Bird (fenómenos de transporte), y que ha servido para el desarrollo de la enseñanza de la ingeniería química en las universidades.



Figura 4.17 Fenómenos de Transporte.

Cabe mencionar que el Doctor Robert Byron Bird, ha recibido un gran número de honores, premios y galardones de gran prestigio, por sus brillantes contribuciones en el campo de la ciencia, entre estos mencionaremos algunos. En el año de 1969, fue nombrado socio distinguido de la Academia Nacional de Ingeniería, y en 1970, fue nombrado compañero de la Sociedad Americana de Física. De igual forma, en el año de 1987, recibió la Medalla Nacional de Ciencia, y en 1989, fue nombrado socio distinguido de la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos. Actualmente es socio del grupo de ingeniería; *Chemical and Biological Engineering, en la universidad de Wisconsin - Madison, así como del grupo de ingeniería; Rheology Research Center.*

4.8 FLUIDOS NO NEWTONIANOS Y FLUIDOS QUE PRESENTAN DOS FASES.

Fue también el siglo **XX**, cuando se comenzaron a estudiar otro tipo de fluidos en los que la viscosidad a temperatura constante depende del gradiente de velocidades; esos fluidos resultaron ser muy comunes en los seres vivos, en la naturaleza, en los fluidos de perforación y en los polímeros. A partir de los estudios de; **Bingham, Ostwald, Nutting, De Waale, Dodge y Metzner** comenzó la nueva ciencia de la reología. Este término fue sugerido en **1929** por el profesor; **Eugene Cook Bingham (1878 – 1945)**, miembro del Lafayette College, Easton Pennsylvania (U.S.A), para definir la rama de la Física que tiene por objeto; el conocimiento de la deformación ó flujo de la materia. Esta definición fue establecida, cuando la; *American Society of Rheology*, se fundó en ese mismo año.



Figura 4.18 Eugene Cook Bingham
(1878 – 1945)

Eugene Cook Bingham distinguido químico y físico de origen americano, nació el día 8 de diciembre de 1878 en la ciudad de Cornwall, Vermont (U.S.A). En los primeros años de su vida se educó en compañía de sus padres, poco tiempo después obtuvo el grado de químico por parte de la universidad de; *Middlebury*, en el año de 1899. Más tarde realizó estudios de doctorado en la universidad de; *Johus Hopkins*, donde obtuvo el grado de doctor en ciencia en

el año de 1905. Posteriormente realizó estudios en las universidades de; *Leipzig, Berlín y Cambridge*. Desde 1906 hasta 1915, ocupó el cargo de profesor de química en la universidad de; *Richmond* de la ciudad de Vermont, y a partir de 1915 hasta 1916, trabajó como asistente de la enseñanza de la física en el instituto; *U. S Bureau of Standars*, en donde laboró sobre el desarrollo de algunos problemas, en particular por; **el estudio del flujo viscoso**. En el año de 1916, Bingham se mudó al *Lafayette College en Easton* (Pennsylvania), donde trabajó el resto de su vida académica. Años más tarde, se retiró del departamento principal como director en 1939, y poco tiempo después, se convirtió en profesor investigador; puesto que sostuvo hasta su muerte. Entre 1906 y 1914, Bingham escribió una serie de trabajos que concernían sobre la; "viscosidad y la fluidez", y a partir de estos trabajos, publicó un artículo, el cual tituló; "*Plastic flow*" (1916). Dichas investigaciones fueron de gran ayuda para el desarrollo de otra serie de trabajos, los cuales trataban sobre; *la viscosidad y la plasticidad*, (investigó sobre el desarrollo de los viscosímetros y los plastímetros), y en 1922, publicó uno de sus mejores libros, el cual tituló; "**fluidity and plasticity**". Con la publicación de este libro Eugene Cook Bingham, fue considerado como uno de los socios más importantes para la fundación de la **American Society of Rheology**, y a partir de estos hechos, el término; "**Rheology**", fue establecido en casi todas sus publicaciones científicas a partir de 1929. Murió el día 6 de noviembre de 1945, en la ciudad de Vermont (U.S.A), a sus 67 años de edad. En la siguiente figura, se ilustra una grafica, que relaciona el comportamiento de algunos fluidos no newtonianos.

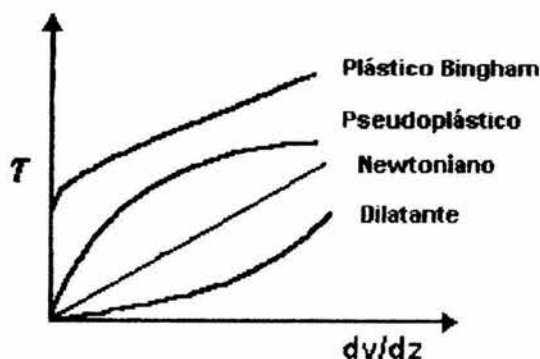


Figura 4.19 Relación entre; el esfuerzo de corte y la velocidad de deformación.

Sin embargo, desde un punto de vista histórico, el origen de la reología se remonta a la segunda mitad del siglo **XVII**, época en la que Robert Hook e Isaac Newton dieron a conocer sus ideas acerca del sólido elástico y del fluido viscoso ideales, respectivamente. La reología moderna estudia el comportamiento de todos los fluidos y en especial de aquellos que no siguen la ley de Newton (fluidos no newtonianos), tales como; *los fluidos de Bingham, los pseudoplásticos, los dilatantes, los tixotrópicos, los reopécticos, y otros*. Estudia también otros sistemas complejos que presentan simultáneamente propiedades elásticas y viscosas, es decir sustancias; *viscoelásticas*. Así, son objeto de la reología materiales tales como: plásticos, fibras sintéticas, pastas, lubricantes, cremas, suspensiones, emulsiones, y otros más, los cuales constituyen la materia prima de las industrias; *farmacéutica, cosmética, agroalimentaria, cerámica, de pinturas, de barnices y otras*.

Los fluidos que presentan cambios al variar la velocidad de corte, reciben el nombre de fluidos no newtonianos; en este caso la viscosidad no permanece constante. A continuación mencionaremos algunos ejemplos más comunes.

Fluidos de Bingham: son aquellos que necesitan de un cierto esfuerzo para comenzar a fluir, tal es el caso de las suspensiones de rocas y arcillas. En la siguiente figura, se ilustra un diagrama, el cual ilustra el comportamiento de un fluido de Bingham.

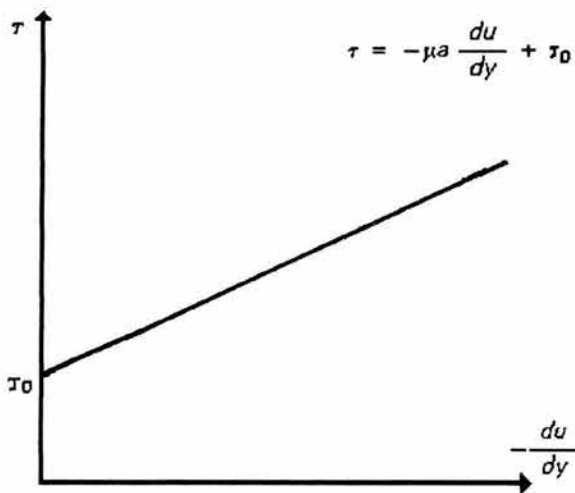


Figura 4.20 Comportamiento de un fluido de Bingham

La ecuación fundamental, que relaciona el comportamiento de un fluido de Bingham, es la siguiente:

$$\tau = \tau_o - \mu_a \frac{du}{dy}$$

Donde: τ_o ; es el esfuerzo de cedencia.

Fluidos pseudoplásticos: en este caso, su viscosidad decrece con el aumento del gradiente de la velocidad. Como ejemplo podemos mencionar las soluciones poliméricas de peso molecular elevado, entre estas la pulpa de papel y la mayonesa. En la siguiente figura, se ilustra un diagrama, el cual ilustra el comportamiento de un fluido pseudoplástico.

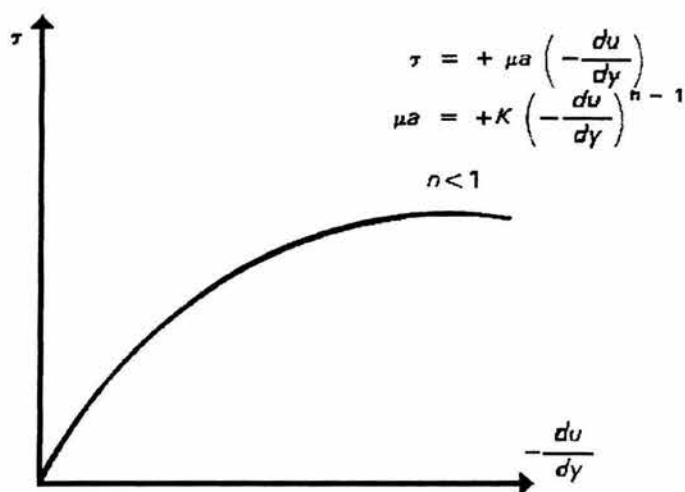


Figura 4.21 Comportamiento de un fluido pseudoplástico

Existen varias ecuaciones que predicen el comportamiento de estos fluidos; la más común es el modelo empírico de Ostwald – de Waale – Nutting:

$$\tau = \mu_a \left(-\frac{du}{dy} \right)$$

$$\mu_a = K \left(-\frac{du}{dy} \right)^{n-1}$$

Donde: n ; es el índice de comportamiento del fluido

k ; es el índice de consistencia del fluido.

Fluidos dilatantes: en este caso, la viscosidad aumenta al aumentar el gradiente de la velocidad. Las suspensiones de almidón, de silicato de potasio y de goma arábiga son ejemplos de fluidos dilatantes. En la siguiente figura, se ilustra un diagrama, el cual ilustra el comportamiento de estos fluidos.

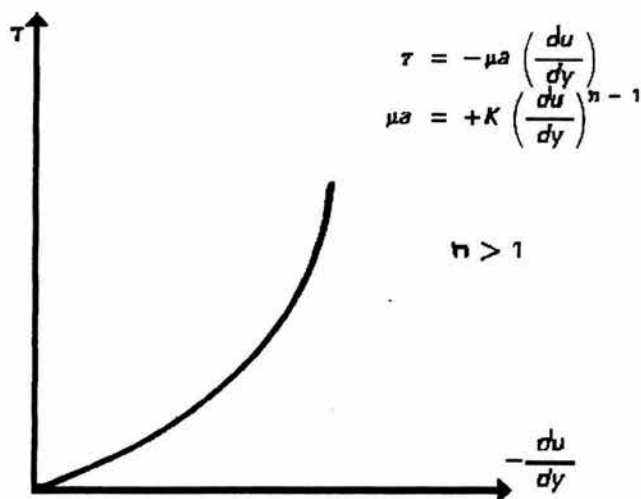


Figura 4.22 Comportamiento de un fluido dilatante

La siguiente expresión, es la ecuación fundamental que relaciona el comportamiento de los fluidos dilatantes:

$$\tau = -\mu_a \left(\frac{du}{dy} \right)$$

$$\mu_a = K \left(\frac{du}{dy} \right)^{n-1}$$

Fluidos tixotrópicos y reopécticos: en este caso, si se somete un fluido a tensiones y a velocidades de deformación, primero crecientes y luego decrecientes, y presenta un ciclo de histéresis, o sea que las curvas de esfuerzo cortante contra la velocidad de deformación no coinciden, se dice que este fluido es tixotrópico o reopéctico. Figuras 4.23 y 4.24.

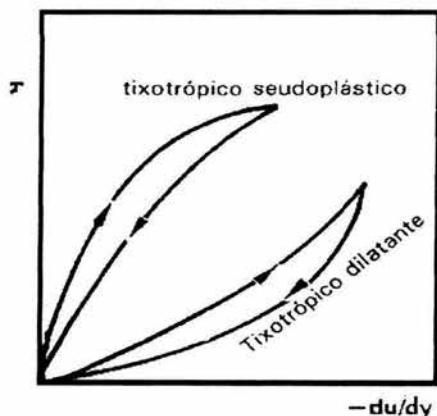


Figura 4.23 Fluidos tixotrópicos

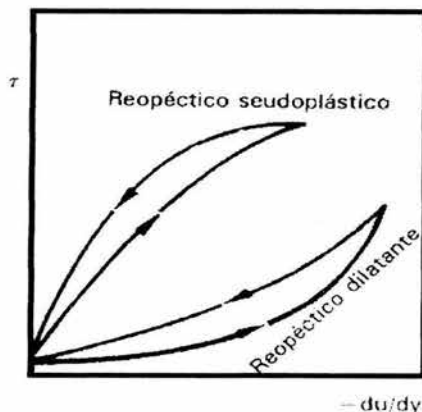


Figura 4.24 Fluidos reopécticos

Un fluido se denomina tixotrópico, si su velocidad aparentemente disminuye con respecto al tiempo, y reopéctico si aumenta. Como ejemplos de fluidos tixotrópicos están los aceites vegetales y minerales, las gelatinas, la miel, la crema de afeitar, las pinturas y la mayonesa. Como ejemplo de fluidos reopécticos están las suspensiones de yeso en agua, así como el pentóxido de vanadio.

Por esa época, también llamó la atención de los científicos el movimiento de sistemas fluidos que presentan dos fases, tal como sucede con las mezclas de; **líquidos y sólidos, de gases y sólidos, y de líquidos y gases**. Estos sistemas son muy comunes en el transporte, hidráulico (lodos), y neumático (polvos), y en el diseño de; *filtros, ciclones, secadores, reactores catalíticos, columnas de destilación y absorción, reactores fluidizados, rehervidores y evaporadores entre otros*. Asociados al estudio de estos sistemas están los nombres de; **Ovid Baker, Robert Kern, Lockhart y Martinelli**. Estos dos últimos, fueron miembros del grupo de investigación, en la universidad de California (Berkeley).

En el año de **1949**, el ingeniero Martinelli publicó un artículo en la revista; *Chemical Engineering Progress*, en compañía del ingeniero Lockhart, el cual titularon:

“Proposed correlation of data for isothermal two – phase, two component flow in pipes”.

Dicha publicación fue de gran ayuda, para el desarrollo y avance del flujo de fluidos a dos fases en tuberías. El conocimiento de flujo de fluidos a dos fases en corrientes paralelas, para el caso de mezclas de líquidos y gases, es esencial para el diseño y la operación de tuberías por las que circulan mezclas de este tipo, y en el diseño y operación de muchos equipos empleados en el procesamiento de materiales. Como ya se dijo, los reactores químicos, los rehervidores, los intercambiadores de calor, y los equipos de transferencia de masa, son ejemplos típicos de equipos de proceso, en los cuales el gas y el líquido fluyen en corrientes paralelas. El movimiento de mezclas de líquidos y gases en tuberías, se presenta con cierta frecuencia en las líneas de flujo de líquido revuelto con gases y vapores; como ejemplo podemos citar el flujo de vapor de agua, ya que se tiene vapor saturado y líquido condensado. Cuando se presentan este tipo de casos es necesario recordar que los fluidos que se están manejando, pueden estarse desplazando con los patrones de flujo a continuación mencionados.

Flujo con burbujas

En este caso, existen burbujas de gases dispersas en el líquido, las cuales se mueven casi a la misma velocidad del líquido. Dicho patrón de flujo se presenta a velocidades superficiales de líquido entre 2 y 5 m/s, y a velocidades superficiales de gas entre 0.3 y 3m/s.

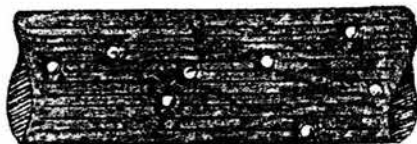


Figura 4.25 Flujo con burbujas

Flujo tapón

En este caso, se presentan tapones alternados de líquido y de gas. El gas se mueve en la parte superior de la tubería. Se da a velocidades superficiales de líquidos menores a 0.8 m/s, y a velocidades de gases menores a 1 m/s.



Figura 4.26 Flujo de tapón o de burbuja

Flujo estratificado

En este caso, el líquido se mueve en la parte inferior de la tubería, y el gas en la parte superior, produciéndose una interfase gas – líquido. Se da cuando la velocidad del líquido es menor a 0.15 m/s, y la velocidad del gas fluctúa entre 0.5 y 3 m/s.

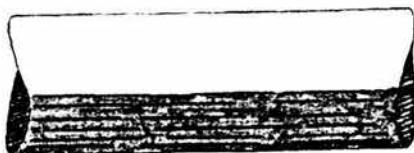


Figura 4.27 Flujo estratificado

Flujo en ondas

Es similar al flujo estratificado, sólo que en este caso hay ondas viajando en la dirección del flujo. Se da cuando la velocidad del líquido es menor a 0.3 m/s, y la velocidad del gas es mayor a 4m/s. También se le conoce como flujo estratificado – ondulado.



Figura 4.28 Flujo en ondas

Flujo de ariete

En este caso, una onda de líquido es arrastrada por el gas periódicamente, formando un ariete de espuma que viaja a gran velocidad por la línea. Los arietes causan severas vibraciones y erosión en el equipo usado, debido al impacto del líquido a alta velocidad contra las conexiones y retornos. Por ello debe evitarse este tipo de flujo. Se da a velocidades de gas superiores a los 10 m/s, y de líquido entre 0.3 y 1m/s.



Figura 4.29 Flujo de ariete

Flujo anular

En este caso, el líquido fluye formando una película alrededor del tubo, con gas en el centro. Una parte del líquido es arrastrada como una lluvia en el centro gaseoso. Además, ocurre a velocidades superficiales de gas superiores a 6 m/s, y a velocidades superficiales de líquido de 0.5 m/s o menores.

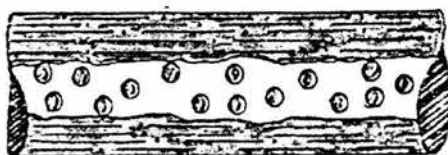


Figura 4.30 Flujo anular

Flujo disperso

En este caso, prácticamente todo el líquido es arrastrado en forma de gotitas en el gas; además, se produce a velocidades de gas superiores a 50 m/s, y a velocidades del líquido entre 5 y 10 m/s. También se le conoce como flujo neblina.

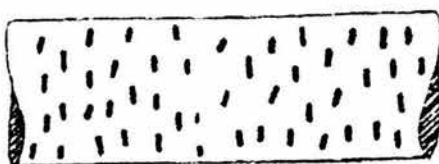


Figura 4.31 Flujo disperso

Para determinar el patrón de flujo que se está dando en tubería que lleva líquido y gas, se hace uso de los parámetros de Baker (B_x y B_y), así mismo se hace uso del diagrama de Baker, el cual es muy útil para determinar estos parámetros:

$$B_x = 0.0215 \frac{L}{G} \frac{\sqrt{\rho_L \cdot \rho_V} \mu_L^{1/3}}{\rho_L^{2/3} \sigma_L}$$

$$B_y = 7.084 \frac{G}{A \sqrt{\rho_L \cdot \rho_V}}$$

Donde: B_x ; es la abscisa de la gráfica

B_y ; es la ordenada de la gráfica

L ; es el gasto másico del líquido

G ; es el gasto másico del gas

ρ_L ; es la densidad del líquido

ρ_V ; es la densidad del vapor o gas

μ_L ; es la viscosidad del líquido

σ_L ; es la tensión superficial del líquido

A ; es el área de la tubería.

En la siguiente figura, se ilustra el famoso diagrama de Baker, el cual es muy útil para obtener el patrón de flujo a dos fases, en tuberías.

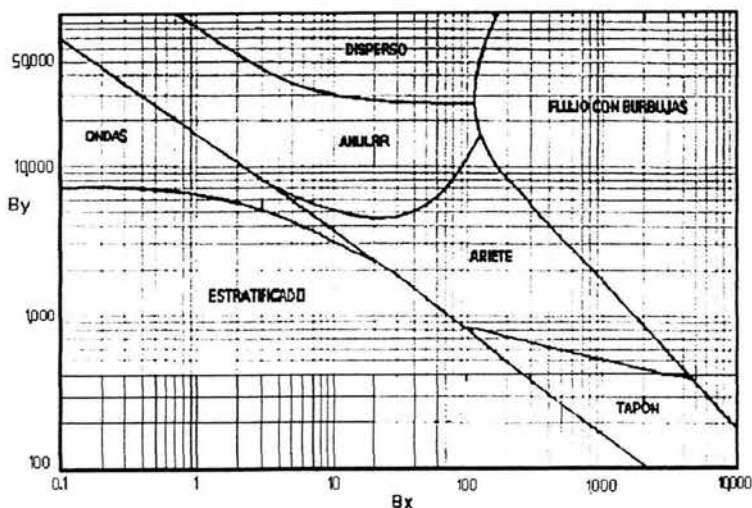


Figura 4.32 Diagrama de Baker

Para determinar las pérdidas de presión por cada 100 metros de longitud de tubo, se hace uso del método propuesto por Lockhart y Martinelli. Este método consiste en evaluar primero la caída de presión en 100 metros de tubería suponiendo que sólo exista gas, corrigiéndose después para dos fases con el factor ϕ^2 .

$$\Delta P_{100} = \frac{f_D L u^2 \rho}{2g_c D} \quad \Delta P_{100(\text{vapor})} = \frac{f_v 8.27 G^2}{D^5 \rho_V}$$

$$\Delta P_{100 (\text{Dos fases})} = \Delta P_{100(\text{vapor})} \phi^2$$

Donde: f_D ; es el factor de fricción para el caso del vapor

G ; es el gasto másico del vapor

D_i ; es el diámetro interno de la tubería

ρ_V ; es la densidad del vapor

ΔP ; es la caída de presión por cada 100 metros de tubería.

Robert Kern presentó la siguiente correlación para el cálculo de:

$$\phi = a X^b$$

$$X^2 = \frac{\Delta P_{100 \text{ liquido}}}{\Delta P_{100 \text{ vapor}}} \quad X^2 = \left(\frac{L}{G} \right)^{1.8} \frac{\rho_V}{\rho_L} \left(\frac{\mu_L}{\mu_V} \right)^{0.2}$$

Donde: ϕ ; es el factor de corrección

a ; es el flujo en fase de vapor

b ; es una constante que depende de X

X^2 ; es el módulo de Martinelli

El factor de corrección se obtiene de acuerdo al tipo de flujo que se maneja en la tubería.

- Con burbujas:

$$\phi = \frac{16.48 X^{0.75}}{(L/A)^{0.1}}$$

- Tapón:

$$\phi = \frac{35.758 X^{0.855}}{(L/A)^{0.17}}$$

- Estratificado:

$$\phi = \frac{54700 X}{(L/A)^{0.8}}$$

- Ariete:

$$\phi = \frac{2.63 X^{0.815}}{(L/A)^{0.5}}$$

• Anular:

$$\phi = aX^b$$

$$a = 4.8 - 12.3 D$$

$$b = 0.343 - 0.82 D$$

D = es el diámetro interno [m]

Para un diámetro nominal mayor o igual a 12 in, usar D = 0.254 m.

• Disperso:

En este caso, se obtuvo una correlación de una gráfica, con la cual se puede obtener el factor de corrección:

$$K = \ln X^2$$

$$\phi = \exp(0.00016460 K^5 + 0.00131285 K^4 + 0.00292911 K^3 + 0.02681767 K^2 + 0.46204966 K + 2.88129179)$$

• Ondas:

$$H_X = \frac{L \mu_G}{G \mu_L}$$

A continuación se muestra una correlación para obtener el factor de fricción Huntington, de gran utilidad para calcular la caída de presión:

$$f_H = \exp(0.2053 \ln H_X - 3.9444)$$

$$\Delta P = 6.379411E-7 \frac{f_H G^2}{D^5 \rho_G}$$



Figura 4.33 Robert Kern
(1920 – 1998)

Robert Kern (1920 – 1998), distinguido ingeniero de proyectos y catedrático de norteamericano, nació el día 15 de mayo de 1920, en la ciudad de Boston Chicago (U.S.A). En el año de 1942, obtuvo el grado de ingeniero mecánico por parte de la universidad de Budapest, Hungría; *Royal Joseph*. Poco tiempo después se asoció al grupo de ingeniería; *Kellogg International Corp (Inglaterra)*, donde trabajó como ingeniero de presupuestos y planeación, en particular sobre: el diseño de tuberías de proceso y la coordinación de plantas de diseño. Fue miembro del grupo de ingeniería; *M. W. Kellogg*, donde trabajó como ingeniero de planeación, y poco tiempo después fue nombrado *ingeniero de sistemas hidráulicos*. También fue miembro del grupo de ingeniería; *Hoffman, – La Roche Inc*, en donde laboró principalmente en el área de ingeniería mecánica sobre el diseño de plantas de proceso. En el año de 1968, presentó uno de sus mejores cursos (Postgraduado), sobre: el diseño de tuberías de proceso, el cual fue de gran interés, para el grupo de ingeniería de la refinería del sur (americana).

En el área de la enseñanza sobresalió con uno de sus mejores libros, el cual trata básicamente sobre: el diseño de tuberías de proceso y el diseño de plantas (arreglo). De igual forma, en el año de 1969 publicó un artículo en la revista; *Hydrocarbon Processing*, el cual tituló:

“How to size Process Piping for two – Phase flow”.

Dicha publicación fue de gran ayuda y avance para el desarrollo de flujo de fluidos a dos fases. De igual forma, también publicó en la revista; *Chemical Engineering*, algunos otros artículos que han sido de gran utilidad, para el desarrollo de flujo de fluidos, entre estos: "How to Compute Pipe Size" (enero de 1975), "Piping Design for Two – Phase Flow" (junio de 1975), "Measuring Flow in Pipes, Orifices and Nozzles" (febrero de 1975), "How to Size Flowmeters" (marzo de 1975). Uno de los mejores honores que recibió el ingeniero Robert Kern, por sus contribuciones a la ciencia, fue el nombramiento de socio distinguido de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME), en el año de 1975. Murió el día 09 de agosto de 1998, en la ciudad de Princeton, Nueva Jersey (U.S.A), a sus 78 años de edad.

CONCLUSIONES

De la presente investigación realizada sobre el desarrollo histórico de la mecánica de los fluidos y de sus próceres, se concluye que se cumplieron los objetivos y metas para la realización de este trabajo, ya que se logró obtener la mayor parte de la información necesaria, así como las biografías y los grabados de la mayor parte de los científicos que contribuyeron al desarrollo de esta ciencia. Existen muchos otros autores que han contribuido al desarrollo de esta ciencia de los fluidos, pero desafortunadamente en este trabajo no se les pudo incluir, debido a la gran diversidad de ellos. Tal es el caso de algunos científicos que han contribuido al desarrollo y estudio de la reología, la turbulencia y el desarrollo de flujo de fluidos a dos fases. No obstante, se espera que más adelante se logre completar la biografía, así como los grabados o fotos de todos esos científicos.

Otro aspecto muy importante que conviene mencionar con respecto, al desarrollo de esta ciencia, es que ha evolucionado día a día de manera impresionante, por lo que es difícil obtener todas esas aportaciones científicas. Sin embargo, consideramos que en el presente trabajo, se tiene la mayor parte de la información necesaria con respecto al conocimiento histórico de esta ciencia. Además gran parte de esa información es de característica valiosa y sustanciosa, y no es tan fácil de obtener en los libros de ingeniería o de mecánica de fluidos. Por lo que el presente material de consulta, contiene ciertas características de pertinencia y trascendencia, que ayudarán sin duda o que serán punto de partida para el estudiante de la carrera de Ingeniería Química.

De igual forma, consideramos que este trabajo de investigación, es uno de los primeros manuales que se ha desarrollado en forma completa en la Facultad de Química de la UNAM. Por consiguiente esperamos que este trabajo sirva de apoyo y utilidad, a los estudiantes y profesores del nivel superior de la carrera de Ingeniería Química. Finalmente quisiera concluir este proyecto, diciendo que la materia de flujo de fluidos, es una de las asignaturas más interesantes, atractivas y útiles del plan de estudios de la carrera del ingeniero químico, pues se relaciona con las primeras etapas del desarrollo histórico de la supervivencia del hombre.

BIBLIOGRAFÍA

1. Antonio Valiente Barderas (2003). "Notas breves sobre la historia de flujo de fluidos". EDUCACIÓN QUÍMICA. Volumen 14. Número 3. Julio - Septiembre. Facultad de Química, UNAM.
2. Antonio Valiente Barderas. Problemas de flujo de fluidos. Ed. Limusa, S. A. de C. V. Grupo Noriega Editores. México, 1997.
3. Beatriz Alvarenga y Antonio Máximo. Física General, - Con Experimentos Sencillos. Editorial: Harla, S. A de C. V. México, D. F. 1997.
4. Claudio Mataix. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas; breve reseña histórica. Editorial: Harla, S. A. de C. V. México 1977.
5. Diccionario Enciclopédico Larousse. Ediciones Larousse, S. A., de C. V., México, D. F. 1995.
6. Enciclopedia ilustrada: El hombre, origen y misterios; americanos, italicos, egipcios, chinos, mesopotamicos, etc. Coordinadores generales: Luis Manuel Layna y Javier Arostegui. España. 1983.
7. Enciclopedia Salvat de la técnica: ¿Cómo funciona?.
8. Francesca Romei y María Antonia Menini. Leonardo da Vinci: artista, inventor y científico del Renacimiento; la hidráulica y el vuelo. Editorial: offset, S. A. de C. V. Comisión Nacional de Libros de Texto Gratuitos. SEP. Libros del Rincón. México, D. F. 2002.
9. James A. Fay. Mecánica de fluidos. Editorial: CECSA. Primera Edición. México, 1996.
10. Laura Talavera y Mario Farias. El vacío y sus aplicaciones. La ciencia desde México. Fondo de Cultura Económica, S. A. de C. V, 1994.
11. Muson, Young y Okushi. Fundamentos de mecánica de fluidos; reseña histórica. México: Limusa. 1990.
12. M. J. Pentz, et al: Curso Básico de Ciencias, Unidad 26. Historia de la Tierra I y II. Ed. Mc – Graw – Hill, Latinoamericana, S. A. México, 1974.

13. Muy Especial: El nacimiento de la civilización. Mesopotamia, Egipto, Valle del Indo, China y Mesoamérica.
14. Muy Especial: Historia de la tecnología. Del descubrimiento del fuego a la revolución industrial.
15. Ramón García Pelayo y Gross. Enciclopedia Metódica Larousse. Ediciones Larousse, S. A. Tomo 2: Historia. México, D. F., 1983.
16. Ramón Peralta Fabi. Fluidos: Apellidos de líquidos y gases; una "historia" de las ideas, Capítulo 1, 2, 3, 4. La ciencia desde México. Fondo de Cultura Económica, S. A. de C. V., 1994.
17. R. I. Tanner and K. Walters, Elsevier. RHEOLOGY: AN HISTORICAL PERSPECTIVE. Amsterdam (1998).
18. Robert Kern, Hoffmann – La Roche Inc., Nutley, N.J. "How to Size Process Piping For Two – Phase Flow". Hydrocarbon Processing; Biografía de Robert Kern. Volumen 48. Numero 10, octubre de 1969. Facultad de Química, UNAM.
19. Biografías de científicos en general.
<http://www.sobiografias.hpg.ig.com.br>
20. Biografías de físicos, matemáticos, astrónomos e ingenieros.
<http://es.geocities.com/fisicas>
21. Biografías de físicos y matemáticos en general
<http://www-gap.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians>
22. Componentes del grupo: Reología Aplicada
<http://www.uv.es/~reologia/>
23. Culturas: aztecas, mayas, incas, egipcios etc.
<http://www.grandestemas.8m.com/culturas.html>
24. Cultura de los incas

<http://www.monografias.com/trabajos4/incas/incas.shtml>

25. Los Enigmáticos Códices

<http://www.mayadiscovery.com/es/historia/codices.htm>

26. Desenvolvimento histórico da mecânica dos fluidos

<http://www.ime.eb.br/~webde1/gloria/Projfinal/Profinal99/grupo15/historico.html>

27. Department of Chemical and Biological Engineering. University of Wisconsin, Madison: Robert Byron Bird

http://www.engr.wisc.edu/che/faculty/bird_byron.html

28. Fundación Canal de Isabel II: El Agua en la historia

<http://www.fundacioncyii.org/index.php3?idseccion=88>

29. Fluid Mechanics Developments and Advancements in the 20th Century

http://in3.dem.ist.utl.pt/downloads/lxaser2000/pdf/01_1.pdf

30. Genovevo Silva Pichardo. Historia de flujo de fluidos. Facultad de Química, UNAM.

<http://depa.pquim.unam.mx/~genovevo/Historia.html>

31. Great Names in Flow: The Flow Hall of Fame

<http://www.flowresearch.com/greatnames/greatnamesinflow.htm>

32. Historia de la hidráulica y de la mecánica de los fluidos

http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/ejercicoh/art%C3%ADculo_historia.html

33. Historia de la ingeniería romana

<http://www.geocities.com/historiaingenieria/INGENIERIAROMANA.html>

34. Historia de las Máquinas. Autor: Pedro Albarracín
<http://www.itm.edu.co/Archivos>
35. Historia de los Acueductos
<http://webs.sinectis.com.ar/mcagliani/hacueducto.htm>
36. Hydraulics Collection
<http://www.lib.uiowa.edu/spec-coll/Bai/hydraul.htm>
37. IMSS – Multimedia Catalogue – Biography Galileo GALILEI
<http://galileo.imss.firenze.it/museo/b/egalilg.html>
38. Key contributors to Fluid Mechanics
<http://www.svce.ac.in/~msubbu/FM-WebBook/History/KeyContributors.htm>
39. La gran Tenochtitlán: Los aztecas
<http://www.elbalero.gob.mx/historia/html/conquista/tenochtitlan.html>
40. Las Invenciones de los Romanos
<http://www.rena.e12.ue/Primeraetapa/historia/romainven.asp>
41. Navegación maya: La navegación entre los mayas
http://sepiensa.org.mx/contenidos/h_mexicanas/pasprehi/mayas/navegacion.htm
42. M. Vega Alonso. Leyes de los gases ideales.
<http://personal.iddeo.es/vegalonso/gases.htm>
43. Navies in Transition. William Froude
<http://www.btinternet.com/~philipr/froude.htm>

44. Población y cultura: Mesoamérica

http://naolinco.igeofcu.unam.mx/atlas/pobla_cultur/pob_cult1.htm

45. Robert Manning (A Historical Perspective). By Dr. Craig Fischenich. April 2000.

www.wes.army.mil/el/emrrp/pdf/sr10.pdf

46. Roberto Córdova "Breve historia de las turbinas hidráulicas".

<http://www.uca.edu.su/deptos/ccnn/dic/pdf/turbinas.pdf>

47. Tecnología antes de la tecnología

<http://www.apct.arrakis.es/revista/n002/arti00202.html>

48. The history of the Darcy – Weisbach Equation

<http://biosystems.okstate.edu/darcy/DarcyWeisbach/Darcy-Weisbach/history.htm>

49. The turbulent history of Fluid Mechanics

<http://www.engr.sju.edu/nikos/courses/me111/pdf/poem - Naomi.pdf>

50. Una cronología mínima, sobre: personajes, obras y acontecimientos, en el contexto de la asignatura "Historia de la física".

<http://www.ffn.ub.es/~lunave/docu/CronoHF.pdf>