



Conceptos fundamentales de física del buceo



PNB Jorge Luis Auletta



FAAS



CMAS

ISBN 978-631-90745-4-3



Auletta, Jorge Luis
Conceptos fundamentales de física del buceo
1ª edición para el alumno.
Ciudad Autónoma de Buenos Aires : FAAS, 2026.
Libro digital, PDF
Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-631-90745-4-3
1. Física Aplicada. 2. Buceo. I. Título.
CDD 627.72

FAAS, Federación Argentina de Actividades Subacuáticas

Autor: PNB Jorge Luis Auletta

Diseño: Oscar D. Ríos

Queda hecho el depósito que marca la Ley 11723

Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización escrita de los titulares del "Copyright", bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la impresión y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos.

CONTENIDO

Prefacio	6
Agradecimientos:	7
UNIDAD 1	9
Sistema de unidades	11
El sistema internacional de unidades	11
Unidades SI de base y suplementarias	12
Unidades SI derivadas utilizadas en buceo con nombres especiales	12
Unidades SI derivadas utilizadas en buceo que se expresan a partir de unidades SI de base	13
Unidades de presión	13
Tablas de equivalencias.....	14
UNIDAD 2	19
La materia y sus estados	21
Estados de la materia	21
Cambio de estado.....	22
Teoría molecular de la materia	22
UNIDAD 3	25
La atmósfera	27
La atmósfera	27
Presión atmosférica	28
El aire	29
Temperatura del aire	30
Densidad del aire	31
¿Qué sucede con la Densidad [δ] del Aire?	32
Calidad del aire	32
Contaminantes del aire	34
Dióxido de carbono [CO_2]	34
Monóxido de carbono [CO].....	34
Óxidos de nitrógeno.....	35
Vapores de aceite	35
Partículas sólidas.....	35
Agua y/o vapor de agua.....	35
Sabores y colores	35
Atmósfera tipo.....	36
Resumen.....	36

UNIDAD 4	37
Los gases y las mezclas gaseosas	39
Introducción al conocimiento de los gases	39
Los gases.....	39
Mezclas gaseosas	44
El agua	47
Ciclo del agua	48
La salinidad	49
Densidad del agua	49
Densidad absoluta	49
Distintos tipos de agua	50
La temperatura	50
El movimiento del agua	51
UNIDAD 5	53
Agentes físicos	55
El sonido	55
Calor y temperatura	59
Temperatura absoluta	60
Transmisión del calor	61
Transformaciones adiabática	63
Aislación térmica.....	64
La luz	65
La reflexión	66
Angulo crítico	68
La difracción.....	69
La absorción cromática.....	70
Cantidad total de luz	71
El ojo humano	72
Visión normal	72
Visión subacuática	73
UNIDAD 6	75
La gravedad	77
Fuerza	77
Representación gráfica de las fuerzas. Vectores.....	78
Análisis de las aletas de buceo.....	81
Pequeña historia de las aletas de buceo	81
Dinámica del movimiento de las aletas.....	81
Análisis de las aletas de buceo.....	82
Conclusiones	85
Trabajo de una fuerza	85
Análisis de un reguladores de demanda.....	87

Densidad	89
Densidad del agua, salinidad, compresibilidad.....	89
Peso del aire	91
Concepto de presión.....	94
Presión atmosférica	95
Presión hidrostática	97
Presión absoluta	98
Variación de la presión absoluta con la altitud.....	99
Cálculo de la presión absoluta y la profundidad	100
Instrumentos de medición.....	100
Manómetros tipo “Tubo de Bourdon”	101
Profundímetros digitales	102
Flotabilidad.....	106
Flotabilidad del cuerpo humano.....	107
Reflotamiento con aire	107
UNIDAD 7	111
Teoría cinética de los gases.....	113
Leyes de los gases.....	115
Causas internas	122
Causas externas	122
Ley general de estado de los gases ideales.....	126
Presión parcial crítica.....	135
Conclusiones:	136
Saturación y desaturación de los tejidos	144
Absorción y liberación de gas	144
De lo ideal a lo real	151
Compresibilidad	156
UNIDAD 8	161
Bibliografía:	163
Índice Alfabético.....	165

Prefacio

Los temas relacionados con la Física de las Inmersiones son contemplados por algunos buzos, con embelesamiento, como si frente suyo estuviera parada Marilyn Monroe, mientras que otros se quedan petrificados por el terror como si estuviesen viendo a Frankenstein.

La realidad es que los tópicos de la Física de las Inmersiones no son ni una cosa ni la otra. La Física del Buceo, es la herramienta más poderosa con que cuentan los buzos para comprender los intrincados fenómenos que se desencadenan cada vez que comienza una inmersión y, por 12 a 24 hs. después de finalizada esta.

Hasta hace algunos años, el conocimiento y entendimiento, de los conceptos de la Física de las Inmersiones podía ser más o menos superficial. Pero en la actualidad cuando los buzos empujan más y más los límites, incursionando en inmersiones cada vez más profundas, utilizando mezcla de gases que hasta hace poco tiempo les estaban vedadas, la cabal comprensión de los conceptos de la física de las inmersiones es de vital importancia para la seguridad.

En este trabajo he querido volcar todos los años dedicados a este hermoso deporte con miles de horas de buceo en casi todos los mares del mundo e inolvidables expediciones, junto con la experiencia que la docencia tanto universitaria como dictando cursos de buceo, talleres, conferencias y charlas me han proporcionado, a través de haber contribuido a formar nuevos docentes y buceadores.

A lo largo del texto se abordan todos los temas relacionados con la física del buceo, y se plantean ejercicios prácticos que siempre que es posible reflejar situaciones reales.

PNB Jorge Luis Anletta

CMAS ARG F00 M3 000001

FAAS PNB 14 000048 Prof.



Agradecimientos:

Al P.N.B. Francisco Lacase, Presidente de la Federación Argentina de Actividades Subacuáticas, que entendió la importancia de profundizar en este tema y nos permitió al P.N.B. Santiago Centineo y a mi exponerlo como un Taller de interés para buzos y aspirantes a docentes de la FAAS.



Dedicado a:

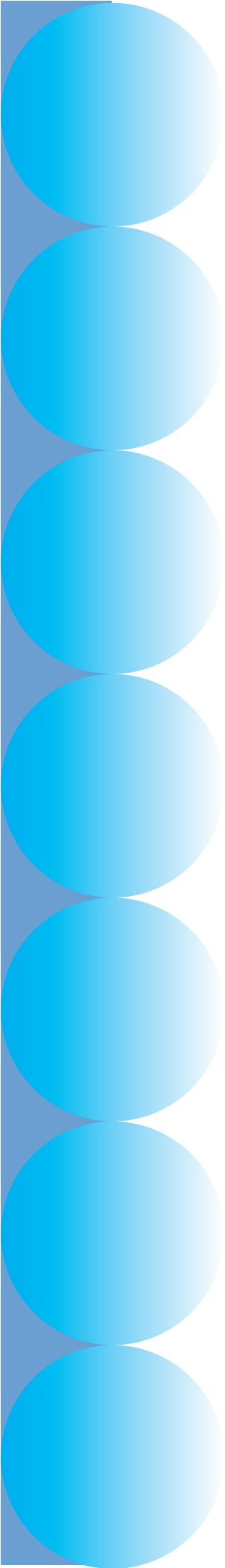
Mi madre Irma Julia Hartmann, que partió hacia un nuevo estado luego de 106 años, mientras finalizaba este trabajo. Gracias por haberme comprado con mucho miedo mis primeros equipos.

A Ciro y Dante, mis nietos, que espero algún día sigan el hermoso camino de este vicio llamado buceo.

Sistema de unidades

1





Sistema de unidades

Comprender y aplicar correctamente el *Sistema Internacional de Unidades*, es de fundamental importancia para adquirir e incorporar los conceptos de la Física del Buceo y, comprender acabadamente los intrincados procesos que gobiernan cada etapa de una inmersión y su periodo posterior. Por ello el *Sistema Internacional de Unidades*, es el primer tema a desarrollar antes de entrar de lleno en el estudio de cada tema propio de la Física del Buceo.

Lord Kelvin (1824-1907) decía:

“Suelo decir con frecuencia que cuando se puede medir aquello de que se habla y expresarlo en números, se sabe algo acerca de ello; pero nuestro saber es deficiente e insatisfactorio mientras no somos capaces de expresarlo en números; lo demás puede significar el comienzo del conocimiento, pero nuestros conceptos apenas habrán avanzado en el camino de la ciencia, y esto cualquiera que sea la materia de que se trate.”

A la Física se la llama *ciencia de la medida*. El medir una magnitud física consiste en encontrar la relación entre su valor y alguna unidad patrón de esa magnitud. Así, cuando se dice que la *longitud* de un objeto es 100 cm, se está expresando que este es 100 veces mayor que la unidad de longitud denominada centímetro.

La República Argentina comparte con los países más desarrollados del mundo la empresa más ambiciosa jamás encarada por el hombre para unificar las unidades y procedimientos de medición.

El *Sistema Métrico Decimal* fue creado en Francia, a fines del siglo XVIII, la simplicidad de su manejo y sus enormes ventajas frente a otros sistemas, como el Imperial (Yarda, Pulgada, Galón, etc.) o el español (Vara, Codo, etc.) determinó su rápida adopción por otros países.

■ El sistema internacional de unidades

Como consecuencia de una resolución de la 9ª Conferencia General de Pesas y Medidas de 1948, el Comité Internacional de Pesas y Medidas inició los estudios y consultas necesarias para establecer un sistema práctico de unidades de medida que fuese universal. La 11ª Conferencia General de Pesas y Medidas de 1960 adoptó tal sistema, bajo el nombre de *Sistema Internacional de Unidades*, cuyas siglas internacionales son *SI*. A partir de dicha conferencia prácticamente todos los países del mundo han adoptado el *SI*.

El *SI* está constituido por nueve unidades (siete de base y dos suplementarias) que corresponden a magnitudes consideradas independientes. Las restantes magnitudes se obtienen en forma coherente a partir de las nueve unidades básicas, esto significa que tales unidades se expresan como productos o cocientes de unidades del grupo de partida, sin la utilización de factores numéricos.

Sería posible definir una unidad arbitraria de cualquier magnitud de interés en física. Sin embargo, bastan las nueve unidades de partida adecuadamente elegidas. La unidad de cualquier otra magnitud puede expresarse entonces como combinación de estas unidades de partida, en algunos casos sólo se requiere relacionar dos magnitudes de partida y en otros tres.

■ Unidades SI de base y suplementarias

		MAGNITUD	NOMBRE	SÍMBOLO
Unidades de partida	Unidades SI de base	Longitud	metro	m
		Masa	kilogramo	kg
		Tiempo	segundo	s
		Intensidad de Corriente eléctrica	ampere	A
		Temperatura termodinámica	kelvin	°K
		Cantidad de materia	mol	mol
		Intensidad luminosa	candela	cd
	Unidades SI suplementarias	Angulo plano	radián	rad
		Angulo sólido	estereorradián	sr

Tabla 1.1: Unidades SI de Base

■ Unidades SI derivadas utilizadas en buceo con nombres especiales

MAGNITUD	NOMBRE	SÍMBOLO	EXPRESIÓN EN UNIDADES SI DE BASE
Fuerza	newton	N	$m \times kg \times s^{-2}$
Presión	pascal	Pa	$m^{-1} \times kg \times s^{-2}$
Tensión eléctrica	volt	V	$m^2 \times kg \times s^{-3} \times A^{-1}$
Resistencia eléctrica	ohm	Ω	$m^2 \times kg \times s^{-3} \times A^{-2}$
Flujo luminoso	lumen	lm	cd \times sr
Iluminancia	lux	lx	$m^{-2} \times cd \times sr$
Temperatura	grado Celsius	°C	°K

Tabla 1.2: Unidades SI utilizadas en el buceo

■ Unidades si derivadas utilizadas en buceo que se expresan a partir de unidades si de base

MAGNITUD	NOMBRE	SÍMBOLO
Superficie	metro cuadrado	m ²
Volumen	metro cúbico	m ³
Densidad	kilogramo por metro cúbico	k/m ³
Concentración	mol por metro cúbico	mol/m ³
Luminancia	candela por metro cuadrado	cd/m ²

Tabla 1.3: Unidades SI utilizadas en el buceo

■ Unidades de presión

La unidad de Presión [P] aceptada por el *Sistema Internacional* es el Kilo Pascal [kPa]. No obstante, mundialmente, por uso y costumbres aún se utilizan un gran número de unidades. Cuando se habla de Presión Atmosférica [PAT], se suele utilizar el milibar [mbar]; como unidad de medida de la Presión Absoluta o Ambiente (como se la suele llamar en las actividades hiperbáricas).

A las unidades si las clasifica en *métricas*, son: bar [bar], Atmósfera [atm], kilogramo por centímetro cuadrado [kg/cm²], metros de agua salada [msw], milímetro de Mercurio [mmHg] y, las *imperiales*, son: Libra por Pulgada Cuadrada [PSI] (Pound Square Inch), Pie de Agua Salada [fsw] (feet salad water). Dos son las unidades generalmente utilizadas en el cálculo de los algoritmos de descompresión, Metros de agua salada [msw] y Pie de Agua Salada [fsw], porque estos modelos trabajan con las Presiones Parciales [Pp] de los gases involucrados y sus valores contienen gran cantidad de decimales; por último, en medicina para las Presiones Parciales [Pp] de los gases alveolares y en sangre se suele utilizar el Milímetro de Mercurio [mmHg]. En el Anexo 1 usted encontrará diferentes tablas de conversión entre las diferentes unidades.

CONVERSIÓN DE UNIDADES ENTRE PIE DE AGUA SALADA [fsw] y METROS DE AGUA SALADA [msw]

Definiciones:

- a. 1 msw se define como 1/10 bar.
- b. 1 fsw se define como 1/33 atm.

Conversiones al SI:

- a. 1 bar = 100 kPa
- b. 1 atm = 1,01325 x 10⁵ Pa
- c. 1 atm = 1,0325 bar

Conversión de Unidades

$$1 \text{ msw} = 0,1 \text{ bar} \times \left[\frac{1 \text{ atm}}{1,01325 \text{ bar}} \right] \times \left[\frac{33 \text{ fsw}}{1 \text{ atm}} \right] = 3,25684678 \text{ fsw}$$

■ Tablas de equivalencias

Tabla 1.- Presiones.

Atmosferas	Bars	10 Newton por Centímetro Cuadrado -N/cm ² -	Libra por Pulgada Cuadrada -PSI-	Columna de Mercurio a 0°C		Metros -m-	Columna de Agua* a 15°C		Pié de Agua Salada (fsw)
				Metros -m-	Pulgadas -In-		Pulgada	Pié de Agua	
1	1.01325	1.03323	14.696	0.76	29.9212	10.337	406.966	33.9139	33.066
0.986923	1	1.01972	14.5038	0.750062	29.5299	10.2018	401.645	33.4704	32.6336
0.967841	0.980665	1	14.2234	0.735559	28.959	10.0045	393.879	32.8232	32.0026
0.068046	0.068947	0.070307	1	0.0517147	2.03601	0.703386	27.6923	2.30769	2.25
1.31579	1.33322	1.35951	19.33369	1	39.37	13.6013	535.482	44.6235	43.5079
0.0334211	0.0338639	0.0345316	0.491157	0.0254	1	0.345473	13.6013	1.13344	1.1051
0.09674	0.09798	0.099955	1.42169	0.073523	2.89458	1	39.37	3.28083	3.19881
0.002456	0.002489	0.002538	0.03609	0.001867	0.073523	0.02540	1	0.08333	0.08125
0.029487	0.029877	0.030466	0.43333	0.02241	0.882271	0.304801	12	1	0.975
0.030242	0.030643	0.031247	0.44444	0.022984	0.904884	0.312616	12.3077	1.02564	1

- 1.- Agua Dulce (fw) = 62.4 lbs/ft³; Agua Salada (fsw) = 64.0 lbs/ft³.
- 2.- La unidad SI para la presión es el Kilopascal (KPA)-1 Kg/cm² = 98.0665 KPA y por definición 1 bar = 100.00 KPA @ 4°C.
- 3.- En el Sistema Metrico, 10 msw se define como 1 bar.
- 4.- Note que la conversión de msw a fsw es diferente según la longitud a convertir. P/ej. 10 msw = 32.6336 fsw y 10 m = 32,8083 ft.

Tabla 2.- Volumen y Capacidad

Centímetros Cúbicos -cm ³ -	Pulgadas Cúbicas -In ³ -	Pie Cubico -ft ³ -	Yarda Cubica -yd ³ -	Milímetros -mm-	Litros -l-	Pintas	Cuarto de Galón	Galón
1	0.061023	3.531 x 10 ⁻⁵	1.3097 x 10 ⁻⁶	1.00000	1 x 10 ⁻³	2.113 x 10 ⁻³	1.0567 x 10 ⁻³	2.6417 x 10 ⁻⁴
16.3872	1	5.787 x 10 ⁻⁴	2.1434 x 10 ⁻⁵	16.3867	0.0163867	0.034632	0.017316	4.329 x 10 ⁻³
28317	1728	1	0.037037	28316.2	28.3162	59.8442	29.9221	7.48052
764559	46656	27	1	764538	764.538	1615.79	807.896	201.974
1.00003	0.0610251	3.5315 x 10 ⁻⁵	1.308 x 10 ⁻⁶	1	0.001	2.1134 x 10 ⁻³	1.0567 x 10 ⁻³	2.6418 x 10 ⁻⁴
1000.03	61.0251	0.0353154	1.308 x 10 ⁻³	1000	1	2.11342	1.05671	0.264178
473.179	28.875	0.0167101	6.1889 x 10 ⁻⁴	473.166	0.473166	1	0.5	0.125
946.359	57.75	0.0334201	1.2378 x 10 ⁻³	946.332	0.946332	2	1	0.25
3785.43	231	0.133681	49511 x 10 ⁻³	3785.33	3.78533	8	4	1

Tabla 3.- Longitud

Centímetros -cm-	Pulgada -In-	Pie -ft-	Yardas	Metros	Braza	Kilómetros	Millas	Milla Náutica
1	0.3937	0.032808	0.010936	0.01	5.468 x 10 ⁻³	0.00001	6.2137 x 10 ⁻⁵	5.3659 x 10 ⁻⁶
2.54001	1	0.08333	0.027778	0.025400	0.013889	2.540 x 10 ⁻⁵	1.5783 x 10 ⁻⁵	1.3706 x 10 ⁻⁵
30.4801	12	1	0.33333	0.304801	0.166665	3.0480 x 10 ⁻⁴	1.8939 x 10 ⁻⁴	1.6447 x 10 ⁻⁴
91.4403	36	3	1	0.914403	0.5	9.144 x 10 ⁻⁴	5.6818 x 10 ⁻⁴	4.9341 x 10 ⁻⁴
100	39.37	3.28083	1.09361	1	0.5468	0.001	6.2137 x 10 ⁻⁴	5.3959 x 10 ⁻⁴
182.882	72	6	2	1.82882	1	1.8288 x 10 ⁻³	1.1364 x 10 ⁻³	9.8682 x 10 ⁻⁴
100000	39370	3280.83	1093.61	1000	546.8	1	0.62137	0.539593
160935	63360	5280	1760	1609.35	80	1.60935	1	0.868393
185325	72962.4	6080.4	2026.73	1852	1013.36	1.85325	1.15155	1

Tabla 4.- Área

Metro Cuadrado -m ² -	Centímetro Cuadrado -cm ² -	Pulgada Cuadrada -ln ² -	Pie Cuadrado -ft ² -	Yarda Cuadrada -yd ² -	Acres	Milla Cuadrada -mill ² -
1	10000	1550	10.7639	1.19599	2.471 x 10 ⁻⁴	3.861 x 10 ⁻⁷
0.0001	1	0.155	1.0764 x 10 ⁻³	1.196 x 10 ⁻⁴	2.471 x 10 ⁻⁸	3.861 x 10 ⁻¹¹
6.4516 x 10 ⁻⁴	6.45163	1	6.944 x 10 ⁻³	7.716 x 10 ⁻⁴	1.594 x 10 ⁻⁷	2.491 x 10 ⁻¹⁰
0.092903	929.034	144	1	0.11111	2.2957 x 10 ⁻⁵	3.578 x 10 ⁻⁸
0.836131	8361.31	1296	9	1	2.0661 x 10 ⁻⁴	3.2283 x 10 ⁻⁷
4046.87	4.0469 x 10 ⁷	6.2726 x 10 ⁶	43560	4840	1	1.5625 x 10 ⁻³
2.59 x 10 ⁶	2.59 x 10 ¹⁰	4.0145 x 10 ⁹	2.7878 x 10 ⁷	3.0976 x 10 ⁶	640	1

Table 5.- Velocidad

Centímetros por Segundo -cm/seg-	Metros por Segundo -m/seg-	Metros por Minuto -m/min-	Kilómetros por Hora -km/h-	Pie por Segundo -ft/seg-	Pie por Minuto -ft/min-	Millas por Hora -mill/h-	Nudos
1	0.01	0.6	0.036	0.0328083	1.9685	0.0223639	0.0194673
100	1	60	3.6	3.28083	196.85	2.23693	1.9473
1.66667	0.016667	1	0.06	0.0546806	3.28083	0.0372822	0.0324455
27.778	0.27778	16.667	1	0.911343	54.6806	0.62137	0.540758
30.4801	0.304801	18.288	1.09728	1	60	0.681818	0.593365
0.5080	5.080 x 10 ⁻³	0.304801	0.018288	0.016667	1	0.0113636	9.8894 x 10 ⁻³
44.7041	0.447041	26.8225	1.60935	1.4667	88	1	0.870268
51.3682	0.513682	30.8209	1.84926	1.6853	101.118	1.14907	1

Tabla 6.- Masa.

Kilogramos	Gramos	Granos	Onzas	Libras	Toneladas (corto)	Toneladas (larga)	Toneladas (métrica)
1	1000	15432.4	35.274	2.20462	1.1023 x 10 ⁻³	9.842 x 10 ⁻⁴	0.001
0.001	1	15432.4	0.035274	2.2046 x 10 ⁻³	1.1023 x 10 ⁻⁶	9.842 x 10 ⁻⁷	0.000001
6.4799 x 10 ⁻⁵	0.6047989	1	2.2857 x 10 ⁻³	1.4286 x 10 ⁻⁴	7.1429 x 10 ⁻⁸	6.3776 x 10 ⁻⁸	6.4799 x 10 ⁻⁸
0.0283495	28.3495	437.5	1	0.0625	3.125 x 10 ⁻⁵	2.790 x 10 ⁻⁵	2.835 x 10 ⁻⁵
0.453592	453.592	7000	16	1	0.0005	4.4543 x 10 ⁻⁴	4.5359 x 10 ⁻⁴
907.185	907185	1.4 x 10 ⁷	32000	2000	1	0.892857	0.907185
1016.05	1.016 x 10 ⁶	1.568 x 10 ⁷	35840	2240	1.12	1	1.01605
1000	10 ⁶	1.5432 x 10 ⁷	35274	2204.62	1.10231	984206	1

Table 7.- Energía o Trabajo

Joules	Ergios	Pie - Libra	Kilowatt Hora	Caballo Por Hora	Kilocalorías	BTUs
1	10 ⁷	0.737682	2.778 x 10 ⁻⁷	3.7257 10 ⁻⁷	2.3889 x 10 ⁻⁴	9.4799 x 10 ⁻⁴
10 ⁻⁷	1	7.3768 x 10 ⁻⁸	2.778 x 10 ⁻¹⁴	3.726 x 10 ⁻¹⁴	2.389 x 10 ⁻¹¹	9.4799 x 10 ⁻¹¹
1.3566	1.3556 x 10 ⁷	1	3.766 x 10 ⁻⁷	5.0505 x 10 ⁻⁷	3.238 x 10 ⁻⁴	1.285 x 10 ⁻³
3.6 x 10 ⁶	3.6 x 10 ¹³	2.6557 x 10 ⁶	1	1.34124	860	3412.76
2.684 x 10 ⁶	2.684 x 10 ¹³	1.98 x 10 ⁶	0.745578	1	641.197	2544.48
4186.04	4.186 x 10 ¹⁰	3087.97	1.163 x 10 ⁻³	1.596 x 10 ⁻³	1	3.96832
1054.87	1.0549 x 10 ¹⁰	778.155	2.930 x 10 ⁻⁴	3.93 x 10 ⁻⁴	0.251996	1

Tabla 8.- Potencia

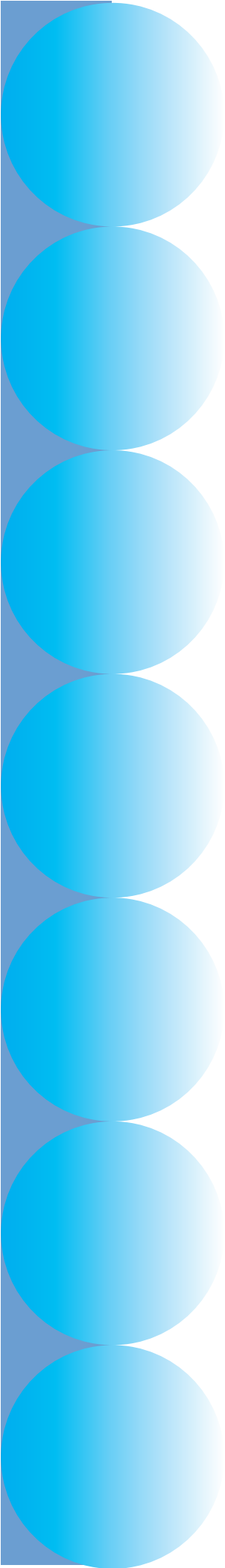
Caballos	Kilowatts	Joules/Segundo	Kg-m Segundo	Pie libras. por Segundo	Calorías por Segundo	BTUs por Segundo
1	0.745578	745.578	76.0404	550	178.11	0.7068
1.34124	1	1000	101.989	737.683	238.889	0.947989
1.3412×10^{-3}	0.001	1	0.101988	0.737682	0.238889	9.4799×10^{-4}
0.0131509	9.805×10^{-3}	9.80503	1	7.233	2.34231	9.2951×10^{-3}
1.8182×10^{-3}	1.3556×10^{-3}	1.3556	0.138255	1	0.323837	1.2851×10^{-3}
5.6145×10^{-3}	4.1861×10^{-3}	4.18605	0.426929	3.08797	1	3.9683×10^{-3}
1.41483	1.05486	1054.86	107.584	778.155	251.995	1

Tabla 9.- Temperatura

Fórmulas de Conversión				$^{\circ}C = (^{\circ}F - 32) \times \frac{5}{9}$				$^{\circ}F = \left(\frac{9}{5} \times ^{\circ}C\right) + 32$					
$^{\circ}C$	$^{\circ}F$	$^{\circ}C$	$^{\circ}F$	$^{\circ}C$	$^{\circ}F$	$^{\circ}C$	$^{\circ}F$	$^{\circ}C$	$^{\circ}F$	$^{\circ}C$	$^{\circ}F$	$^{\circ}C$	$^{\circ}F$
-100	-148.0	-60	-76.0	-20	-4.0	20	68.0	60	140.0	100	212.0	140	284.0
-98	-144.4	-58	-72.4	-18	-0.4	22	71.6	62	143.6	102	215.6	142	287.6
-96	-140.8	-56	-68.8	-16	3.2	24	75.2	64	147.2	104	219.2	144	291.2
-94	-137.2	-54	-65.2	-14	6.8	26	78.8	66	150.8	106	222.8	146	294.8
-92	-133.6	-52	-61.6	-12	10.4	28	82.4	68	154.4	108	226.4	148	298.4
-90	-130.0	-50	-58.0	-10	14.0	30	86.0	70	158.0	110	230.0	150	302.0
-88	-126.4	-48	-54.4	-8	17.6	32	89.6	72	161.6	112	233.6	152	305.6
-86	-122.8	-46	-50.8	-6	21.2	34	93.2	74	165.2	114	237.2	154	309.2
-84	-119.2	-44	-47.2	-4	24.8	36	96.8	76	168.8	116	240.8	156	312.8
-82	-115.6	-42	-43.6	-2	28.4	38	100.4	78	172.4	118	244.4	158	316.4
-80	-112.0	-40	-40.0	0	32.0	40	104.0	80	176.0	120	248.0	160	320.0
-78	-108.4	-38	-36.4	2	35.6	42	107.6	82	179.6	122	251.6	162	323.6
-76	-104.8	-36	-32.8	4	39.2	44	111.2	84	183.2	124	255.2	164	327.2
-74	-101.2	-34	-29.2	6	42.8	46	114.8	86	186.8	126	258.8	166	330.8
-72	-97.6	-32	-25.6	8	46.4	48	118.4	88	190.4	128	262.4	168	334.4
-70	-94.0	-30	-22.0	10	50.0	50	122.0	90	194.0	130	266.0	170	338.0
-68	-90.4	-28	-18.4	12	53.6	52	125.6	92	197.6	132	269.6	172	341.6
-66	-86.8	-26	-14.8	14	57.2	54	129.2	94	201.2	134	273.2	174	345.2
-64	-83.2	-24	-11.2	16	60.8	56	132.8	96	204.8	136	276.8	176	348.8
-62	-79.6	-22	-7.6	18	64.4	58	136.4	98	208.4	138	280.4	178	352.4

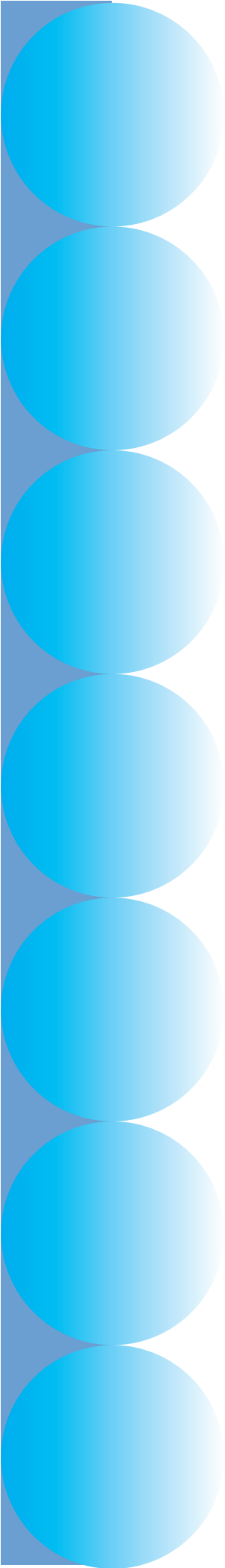
Tabla 10.- Presión Atmosférica

Altitud	Atmsferas Absolutas	Milímetros de Mercurio	Libras por Pulgada Cuadrada Absolutas	Milibar	Kilopascales	
					m	ft
152	500	0.982	746.4	14.43	995.1	99.51
305	1000	0.964	732.9	14.17	977.2	97.72
457	1500	0.947	719.7	13.92	959.5	95.95
610	2000	0.930	706.7	13.66	942.1	94.21
762	2500	0.913	693.8	13.42	925.0	92.50
914	3000	0.896	681.1	13.17	908.1	90.81
1067	3500	0.880	668.7	12.93	891.5	89.15
1219	4000	0.864	656.4	12.69	875.1	87.51
1372	4500	0.848	644.3	12.46	859.0	85.90
1524	5000	0.832	632.4	12.23	843.1	84.31
1676	5500	0.817	620.6	12.00	827.4	82.74
1829	6000	0.801	609.0	11.78	812.0	81.20
1981	6500	0.786	597.7	11.56	796.8	79.68
2134	7000	0.772	586.4	11.34	781.9	78.19
2286	7500	0.757	575.4	11.13	767.1	76.71
2438	8000	0.743	564.5	10.92	752.6	75.26
2591	8500	0.729	553.8	10.71	738.3	73.83
2743	9000	0.715	543.3	10.50	724.3	72.43
2896	9500	0.701	532.9	10.30	710.4	71.04
3048	10000	0.688	522.7	10.11	696.8	69.68



La materia y sus estados





La materia y sus estados

A través de los sentidos: el Oído, la Vista, el Tacto, el Sabor y, el Olfato, el hombre es capaz de distinguir los objetos que lo rodean y diferenciar su forma, color, textura, etc. De todas sus propiedades hay dos que le son comunes a todos los objetos: el Peso y su Volumen, por lo cual se define a la materia como:

“Materia es todo aquello que tiene PESO y VOLUMEN y ocupa un lugar en el ESPACIO”

Con la simple observación de los objetos se advierte que las materias que los constituyen varían de unos a otros, de donde cada clase de materia recibe el nombre de SUSTANCIA:

“Sustancia es una materia con propiedades particulares que la distinguen de las demás”

Existen ciertos fenómenos físicos como la Luz, el Sonido y, el Calor, que, si bien son percibidos por los sentidos, no poseen peso, ni ocupan un lugar en el espacio, a estos se los llama Agentes Físicos; y algunos de ellos tienen gran influencia en la práctica de una inmersión.

■ Estados de la materia

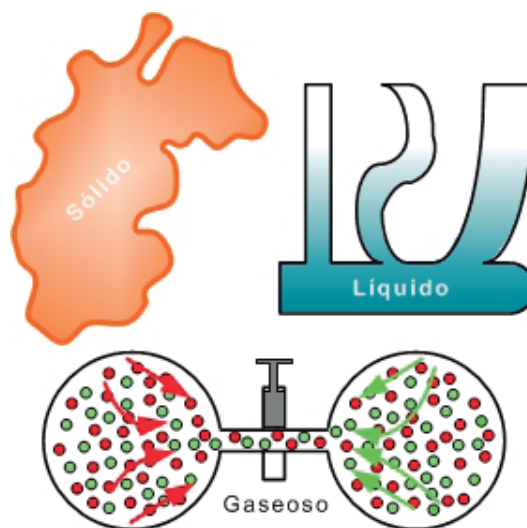


Figura 2.1: Estados de la materia

La materia se presenta en la naturaleza bajo tres estados físicos:

- ✓ Sólido
- ✓ Líquido
- ✓ Gaseoso

Cada estado se define sobre su capacidad para mantener su Forma y su Volumen.

Por lo tanto, un cubo de Plomo [Pb] siempre será cúbico, manteniendo su forma y volumen. El agua en cambio, tomará la forma del recipiente que la contenga, pero su volumen no variará. Mientras que un gas tomará la forma del recipiente que lo almacene y además ocupará todo su volumen.

■ Cambio de estado

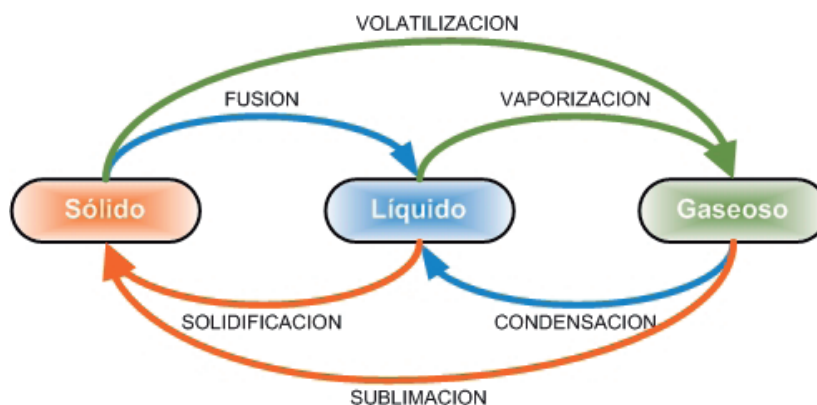


Figura 2.2: Cambios de Estados de la materia.

Las diferentes materias son susceptibles de pasar de un estado de agregación a otro. Todo cambio de estado implica que la materia debe ceder o tomar energía. Al paso de un estado a otro se los denomina como muestra la figura.

En el ámbito del buceo el proceso de vaporización es el que mayor relevancia tiene, pues siempre que existe evaporación de agua sobre la piel o, cuando el sistema respiratorio acondiciona la mezcla respirada aparece este fenómeno.

Teoría molecular de la materia

El hecho que los líquidos fluyen y los gases difunden con facilidad, sugiere que todas las sustancias tienen una estructura corpuscular, formada por pequeñas partículas. Esta hipótesis se haya apoyado por miles de fenómenos físicos y químicos, que ratifican que la materia en todos sus estados se halla constituida por minúsculas partículas llamadas moléculas, y se ha comprobado que todas las moléculas de una misma sustancia son idénticas, es decir que tienen la misma estructura y, las mismas propiedades físicas y químicas.

Moléculas se las puede imaginar como minúsculas esferas rígidas, con una estructura interna formada por expresiones más pequeñas llamadas átomos. La palabra átomo, proviene del griego y significa indivisible, expresión poco afortunada para nombrarlo pues como se sabe estos son unas agrupaciones relativamente complejas de partículas subatómicas, y que existen distintos métodos para su separación; siendo el más conocido el proceso de la fisión nuclear, con el cual se fabricó la primera bomba atómica.



Figura 2.3: Fuerzas intermoleculares

Entre las moléculas de una misma Materia existen dos fuerzas que interactúan constantemente, una Fuerza de Atracción [FA] y otra Fuerza de Repulsión, [FR], el estado de agregación de la materia (sólido, líquido, gaseoso) depende de cual fuerza prevalece sobre la otra.

Así en un sólido la magnitud de la Fuerza de Atracción [FA] es muy superior a la de la Fuerza de Repulsión [FR], en un líquido estas fuerzas son iguales, mientras que en un gas la primera es muy inferior a la segunda.

El físico Niels Henrik David Bohr (Copenhague, Dinamarca; 7 de octubre de 1885 -18 de noviembre de 1962), fue quien en 1913 propone el primer modelo que describe al átomo. Este, imagina los átomos como sistemas solares en miniatura, con un centro llamado núcleo, formado por dos tipos de partículas subatómicas llamada una Protón [P+], con carga eléctrica positiva, y la otra Neutrón [N], sin carga eléctrica, que forman un grupo muy compacto; y girando a su alrededor en órbitas circulares o elípticas, se hallan los Electrones [E-] con carga eléctrica negativa. La única excepción en este modelo, es el átomo de Hidrógeno [H_2], cuyo núcleo no posee neutrones.

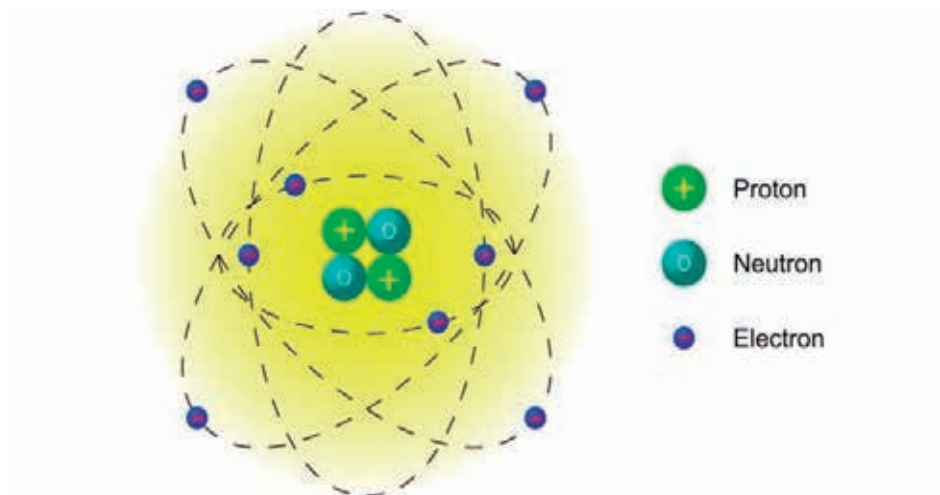


Figura 2.4: Estructura del Átomo

Como el número de protones y de electrones es siempre igual para un mismo átomo, las cargas positivas y negativas también lo son, manteniéndose la estabilidad eléctrica del átomo y la estructura del mismo estable, pues las partículas subatómicas no tienden a separarse, mientras estos sean excitados en forma externa.

La cantidad de Protones, Neutrones y Electrones, determina la masa del átomo, mientras que el diámetro de las órbitas de los electrones su tamaño.

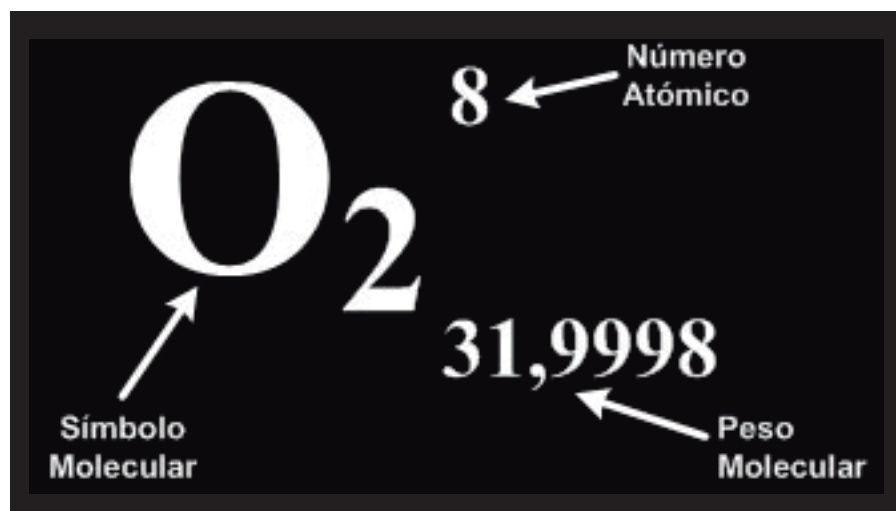


Figura 2.5: Interpretación de los Símbolos de la Tabla Periódica

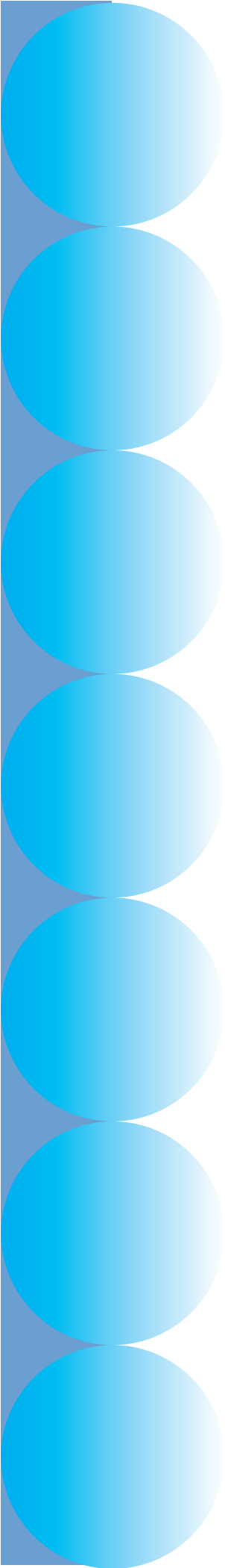
El átomo de menor masa atómica es el Hidrógeno [H_2], cuyo núcleo está constituido por un solo Protón [$P+$], girando a su alrededor se encuentra un solo Electrón [$E-$]. El Hidrógeno [H_2] es el único elemento que no posee Neutrones [N] en su núcleo. A este le sigue el Helio [He], cuyo núcleo se compone de dos protones y dos neutrones, y tiene dos electrones orbitando y así sucesivamente. Se han identificado 109 elementos en la naturaleza, que fueron ordenados en 1879 por químico ruso Dimitri Ivánovich Mendeléyev (Ruso - 8 de febrero de 1834 - 2 de febrero de 1907) en la Tabla Periódica de los Elementos, con la simbología que muestra la figura. En la cual el nombre del elemento se encuentra resumido en una inicial formada por una o dos letras, por ejemplo: Oxígeno: O, Argón: Ar; el subíndice indica la cantidad de átomos que forman la molécula de este; el Número Atómico, su ubicación dentro de la tabla y el Peso molecular, nos dice cuanto pesa la molécula del elemento en moles.

Los compuestos químicos como el Monóxido de Carbono [CO], Dióxido de Carbono [CO_2] o el Agua [H_2O], por estar formados por más de un elemento no se hallan en la tabla periódica, por lo tanto, no poseen Número Atómico, pero sí Peso Molecular.

La atmósfera

3





La atmósfera



Figura 3.1: La Atmósfera

El objetivo perseguido en el siguiente apartado es, tratar de explicar una serie de conceptos básicos que le permitan comprender al lector las características, composición e importancia de esta capa de mezcla de gases que nos rodea y su influencia en la práctica de las inmersiones. A continuación, un índice de los puntos tratados:

1. La Atmósfera
2. Presión atmosférica.
3. Temperatura del aire.
4. Densidad.
5. Atmósfera tipo.

■ La atmósfera

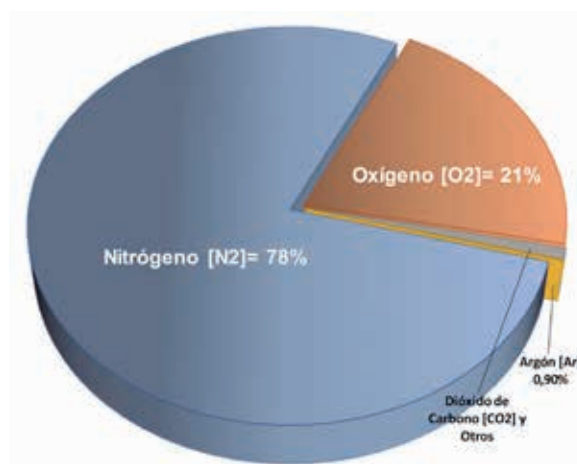


Figura 3.2: Composición del Aire Atmosférico

La Atmósfera es la capa gaseosa que rodea al planeta Tierra, está compuesta principalmente por una mezcla de gases: 78% de Nitrógeno [N₂], 21% de Oxígeno [O₂] y 1% de otros gases, que denominamos Aire. A estos gases constituyentes de la Atmósfera, debemos añadir el Vapor de Agua.

El Vapor de Agua, se concentra en las capas más bajas de la atmósfera y su cantidad depende de las condiciones climatológicas y la localización geográfica, pudiendo variar este entre el 0% y el 5%. A medida que aumenta el Vapor de Agua, los demás gases disminuyen proporcionalmente.

Esta mezcla gaseosa que denominamos Aire o Aire Atmosférico, tiene muchas características importantes, pero para poder explicar su importancia en el buceo, interesa centrarse en las básicas que definen su comportamiento como un Fluido: Presión [P], Temperatura [T] y Densidad [δ]. Como se verá a lo largo de ítems de este trabajo, estos tres conceptos están íntimamente relacionados y afectan de forma importante la práctica de las inmersiones.

■ Presión atmosférica

Se define como Presión [P] a la cantidad de Fuerza [F] aplicada por unidad de Superficie [S].

$$P = F/S$$

De acuerdo con esta definición, Presión Atmosférica [PA_t] es la Fuerza [F] ejercida por la Atmósfera sobre una unidad de Superficie [S]. La Fuerza [F], se debe al Peso [W] del Aire contenido en una columna imaginaria que tiene como base una unidad de superficie equivalente a 1 m².

La altura [h] de esta columna y por tanto el peso del aire que contiene, depende del punto geográfico en que nos encontremos. A nivel del mar, la columna que tenemos encima es mayor que en la cumbre de una montaña, la cual es a su vez mayor que la que tendríamos en la cima del Everest.

Esta circunstancia indica que una primera característica del Aire es, que la Presión [P] decrece con la altura, entonces:

“a mayor Altura [h] menor Presión [P]”.

La magnitud de este decrecimiento es, de 1 milibar por cada 10 metros de altura (1 pulgada por cada 1.000 pies) aproximadamente (1 mb por cada 9 m. o 1” por cada 1.000 ft).

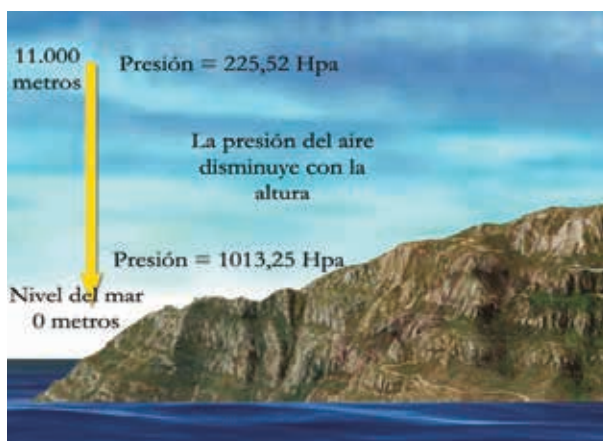


Figura 3.3: Disminución de la Presión Atmosférica con la Altura

Debido a esta característica y como las Tablas de Descompresión están calculadas a la Presión Atmosférica a Nivel del Mar [PA_{tNM}], (PA_{tNM}= 1020 mb), cuando se realizan inmersiones en espejos de agua de montaña, donde la Presión Atmosférica [PA_t] es menor a este valor, para evitar un accidente de buceo, estas deben ser corregidas para cada altura diferente de inmersión. Este tema se estudia detalladamente en “Buceo de Altura” o “Inmersiones Hipobáricos”.

Además, los aviones que vuelan por encima de una altura determinada deben estar provistos de sistemas de presurización de la cabina de pasajeros, esto también obliga a calcular el tiempo mínimo de espera antes de realizar un vuelo después de realizar inmersiones o corregir las Tablas de Descompresión. Este tema se estudia detalladamente en “Vuelos después de Bucear”.

Para medir la presión atmosférica, se puede utilizar un barómetro de mercurio [Hg], un barómetro aneroide, u otro aparato más sofisticado. Las unidades normalmente empleadas son: milímetros de Mercurio [mmHg], milibares (1 mb=10³ dinas/cm²) o pulgadas de mercurio (1 pulgada del barómetro de mercurio equivale aproximadamente a 34 mb).

El tema de la Presión Atmosférica [PA_t], se estudiará detalladamente en el tema “La Presión”.

El aire

COMPOSICIÓN DEL AIRE SECO		PORCENTAJE	SIMPLIF	
Oxígeno	O ₂	20,946	21,00	
Nitrógeno	N ₂	78,084	79,00	
Dióxido de Carbono	CO ₂	0,033		
Argón	Ar	0,934		
Gases Raros	Neón	Ne		
	Helio	He		
	Criptón	Kr		
	Hidrógeno	H ₂		0,003
	Xenón	Xe		
	Radón	Ra		
	Monóxido de Carbono	CO		
TOTALES		100,00	100,00	

Tabla 3.a: Composición porcentual del aire seco

Como se ha definido, el Aire es una mezcla gaseosa cuya composición cuantitativa aproximada se muestra en la Tabla 3.a.

A los efectos de los estudios relacionados con el comportamiento del Aire sobre el organismo durante las inmersiones, se considerará a este como una mezcla binaria compuesta por 79% de Nitrógeno [N₂] y, 21% de Oxígeno [O₂].

Como los otros gases presentes en el aire, se encuentran en pequeñas proporciones, hace que no se los considere en los cálculos y su porcentaje se le suma al Nitrógeno [N₂].

■ Temperatura del aire

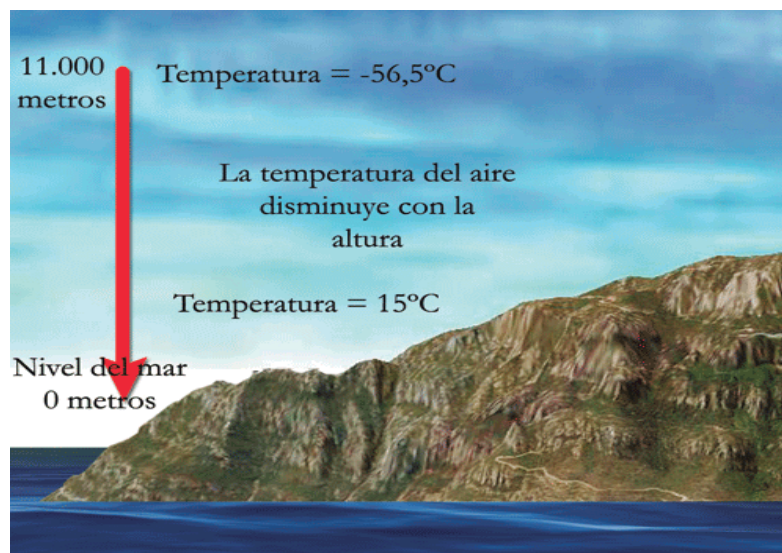


Figura 3.4: Disminución de la Temperatura con la Altura

El calor del sol atraviesa la atmósfera sin elevar significativamente su Temperatura [T]. Pero, la Tierra absorbe dicho calor, eleva su temperatura, y la cede gradualmente a las capas de aire en contacto con ella. En este ciclo continuo, cuanto más alejadas están las capas de aire de la tierra menos calor reciben de esta.

Debido a esto, una segunda característica del Aire, es que la Temperatura [T], disminuye con la Altura [h], entonces:

“a mayor Altura [h] menor Temperatura [T]”.

La magnitud de este decrecimiento es de aproximadamente 6,5 °C cada 1.000 metros (1,98 °C cada 1000 pies).

Estas magnitudes son válidas hasta una altura de 11.000 m. (36.090 pies), a partir de la cual la temperatura se considera constante a -56,5°C.

Esta característica es importante en toda operación de buceo pues, la influencia de la temperatura en el aire contenido en el botellón de buceo es grande, como se estudiará en el tema “Leyes de los Gases”.

Aunque las magnitudes expresadas, no se cumplen exactamente al no ser el aire un gas ideal, estos valores medios son válidos como indicativos del comportamiento del aire.

Si se calienta una masa de gas contenida en un recipiente cerrado, la Presión [P] que ejerce esta masa sobre el recipiente se incrementa, lo cual demuestra que hay una relación directa entre Temperatura [T] y Presión [P]. Así, la Presión [P] del aire cálido es mayor que la del aire frío. Por lo cual, es normal asociar en forma intuitiva las predicciones metodológicas, de altas presiones con calor y bajas presiones con frío.

■ Densidad del aire



Figura 3.5: Densidad

La Densidad [δ] de cualquier cuerpo sea sólido, líquido o gaseoso expresa, la cantidad de Masa [M] del mismo por unidad de Volumen [V]

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

Si se comprime, una misma masa de gas tendrá menos Volumen [V], visto de otro modo, las moléculas del gas están más próximas. Es decir, la Densidad [δ] de un gas, aumenta o disminuye en relación directa con la Presión [P] que soporta. Puesto que la con la Altura [h] disminuye la Presión Atmosférica [Pat] disminuirá la Presión Parcial [Pp] de los gases que componen el Aire y según la relación expresada también lo hará la Densidad [δ], o sea que:

“a mayor Altura [h,] menor Densidad [δ] “

Por otro lado, si se aplica Calor [Q] a un cuerpo este se dilata y aumenta su Volumen [V], de forma que al incrementándose el volumen habrá igual Masa [M], o lo que es equivalente su Densidad [δ] será menor. Así pues, al aumentar la Temperatura [T] del aire disminuye su Densidad [δ] entonces:

“a mayor Temperatura [T], menor Densidad [δ]”

Se plantea ahora un dilema, porque si al aumentar la Altura [h] por un lado, disminuye la Presión [P] y con esta disminuye la Densidad [δ] y por otro disminuye la Temperatura [T] y según lo dicho debería aumentar la Densidad [δ],

¿Qué sucede con la Densidad [δ] del Aire?

Pues bien, lo que sucede es que influye en mayor medida la disminución de la Presión [P]; que la variación de la Temperatura [T], resultando que:

“a mayor Altura [h], menor Densidad [δ]”

Debido a estas dos características, se deben extremar las medidas de seguridad cuando se realizan inmersiones en espejos de agua de montaña, donde la Presión Atmosférica [PA_t] es menor a la Presión Atmosférica a Nivel del Mar [PA_t NM]. Este tema se estudia detalladamente en “Buceo de Altura” o “inmersiones Hipobáricas”.

■ Calidad del aire

Uno de los principales cuidados que todo buzo debe tener es, el control de la calidad o pureza del aire y/o los gases destinados a fabricar mezclas gaseosas (Nitrox, Heliox, Trimix, etc.) que va a utilizar durante su inmersión.

El aire destinado para ser respirado en todo tipo de inmersiones, proviene en general de la atmósfera. Pero el aire atmosférico contiene vapor de agua, hidrocarburos y aceites, polvo, gases contaminantes (Monóxido de Carbono [CO], Dióxido de Carbono [CO₂]), y otros tipos de impurezas (Óxidos de Azufre, Dióxido de Nitrógeno, etc.) en diferentes grados.

La contaminación del aire, proviene de muy variadas y diferentes fuentes. Las industrias y las emanaciones de los motores de combustión interna se encuentran entre las principales. Al momento de recargar un cilindro de buceo, a la contaminación presente en el Aire Atmosférico se le suma las originadas por el motor del compresor y, las causadas por el sistema de lubricación del mismo.

Previo a que el aire sea considerado apto para el consumo por un buzo durante una inmersión; este tiene que ser filtrado, comprimido, enfriado, secado, purificado y tratado químicamente de modo que no posea ningún tipo de contaminación, ni sabor y/u olores desagradables. Recién luego de este proceso se puede afirmar que el mismo posee las características de pureza requeridas y que por lo tanto es seguro para ser respirados en condiciones hiperbáricas.

Cada tienda de buceo, barco, club, etc. tiene se propia configuración en las instalaciones destinadas a la carga de aire de los botellones de buceo, pero todas ellas tienen un elemento en común que es el compresor de aire.

Los compresores de aire que alimentan todo tipo de instalación destinadas a recargar los tanques de aire para buceo, requieren de control y mantenimiento preventivo y correctivo con mayor frecuencia y exigencia que para otras actividades, para eliminar toda posible causa de contaminación del aire.

Una carga de aire mal procesada, puede causar fuertes dolores de cabeza, náuseas, u otras dolencias graves ocasionadas por diferentes impurezas (por ejemplo, vapores de aceite) y/o gases contaminantes como el Monóxido de Carbono [CO] o el Dióxido de Carbono [CO₂].

Es por este motivo, que todo buceador tiene la obligación de conocer por su propia seguridad y la de su compañero, las causas de contaminación del aire (impurezas y gases), sus efectos durante una inmersión, los pasos necesarios para la obtención de aire puro y los estándares de calidad del mismo.

La ubicación de la toma de aire del compresor reviste de gran importancia. La misma tiene que hallarse alejada de toda fuente de contaminación, este es un factor preponderante para asegurar la pureza inicial del aire a procesar y la calidad final del mismo. La toma de aire del compresor no puede encontrarse próxima al escape de gases de un motor de combustión interna, arcos eléctricos, fuentes de humos, etc.

Los estándares de pureza del aire destinado a ser respirado, son altamente exigentes, este debe hallarse libre de partículas de polvo, o aceites y agua, como así también no deben estar contaminado con gases nocivos para el hombre tales como el Monóxido de Carbono [CO] o el Dióxido de Carbono [CO₂] que respirados bajo los efectos de la presión pueden alcanzar valores de concentración nocivos.

ITEM	NEDU	CGA	BSAC
Oxígeno [O ₂]	20 / 21 %	19 / 23 %	21 ± 0,5 %
Monóxido de Carbono [CO]	< 0,002 %	< 0,002 %	< 0,3 %
Dióxido de Carbono [CO ₂]	< 0,10 %	< 0,05 %	< 0,001 %
Vapores de Aceite (MÁXIMOS)	5 mg/m ³	5 mg/m ³	1 mg/m ³
Partículas sólidas	No detectables	No detectables	No detectables
Agua [H ₂ O]	No detectables	No detectables	No detectables
Olor	Inodoro	Inodoro	Inodoro

Tabla 3.b: Valores de contaminantes aceptados

Toda contaminación, debe ser evitada o removida previo a que el aire sea considerado apto para el buceo. La entrada de aire debe estar provista de un filtro de malla adecuada que remueva las partículas de polvo en suspensión de tamaño no apto para ser respiradas. Mientras que a la salida debe contar con un sistema mediante un proceso de oxidación convierta el Monóxido de Carbono [CO] en Dióxido de Carbono [CO₂] para que luego un filtro en base a Cal Sodada extraiga este. Y un filtro de Carbón Activado cuya función es remover olores y sabores.

La Tabla 3.b muestra, los estándares de calidad del aire a utilizar en las operaciones de buceo propuestos por la Marina de los Estados Unidos, a través de la Experimental Diving Unit (NEDU), la Asociación de Gases Comprimidos (CGA) de los Estados Unidos y el British Sub-Aqua Club (BS-AC), los cuales han sido adoptados por la mayoría de las organizaciones de buceo deportivo recreativo, científico-técnico y armadas de todo el mundo.

■ Contaminantes del aire



Figura 3.6: Contaminación del aire

Dióxido de carbono [CO₂]

Este gas produce la intoxicación llamada Hipercadmia y contribuye a desarrollar la narcosis de nitrógeno. La cantidad máxima admisible aprehensión normal atmosférica es de 5000 ppm. Pero considerando que en una operación de buceo la presión parcial de este gas puede alcanzar valores significativos. El valor máximo tolerable es de 500 ppm.

Monóxido de carbono [CO]

El Monóxido de Carbono [CO] como contaminantes del aire es altamente peligroso pues no tiene olor ni sabor y posee una elevada toxicidad por la gran afinidad que tiene con la hemoglobina. El Monóxido de Carbono [CO] presente en el aire sustituye al Oxígeno [O₂] formando un compuesto llamado "Carboxihemoglobina", creando fenómenos de envenenamiento cursa síntomas y signos que van desde un simple mareo a la reducción de las habilidades mentales, hasta el colapso total.

Óxidos de nitrógeno

Los Óxidos de Nitrógeno [$NxOx$], provienen de la combustión de los motores. En bajas concentraciones produce irritación de las vías respiratorias y de los ojos, mientras que alta concentraciones provoca enfisema pulmonar y bronquitis.

Vapores de aceite

Los vapores de aceite que pueden contaminar el aire de un botellón no producen en trastornos fisiológicos. La consecuencia de su presencia es que se pueden presentar náuseas y sabor desagradable en el aire lo cual no deja de resultar perjudicial y peligroso si las náuseas aparecen durante el curso de la inmersión. El valor máximo tolerable es de 1 mg/m³.

Partículas sólidas

La presencia de partículas sólidas en el interior del cilindro de buceo, se debe a:

1. El polvo que se introduce a través de la toma de aire y no es retenido por los filtros.
2. Descomposición de las sustancias químicas del sistema de filtros.
3. Desprendimiento de partículas metálicas producidas por corrosión de la pared y fondo en los botellones de acero.

Todas estas causas son evitables con un correcto mantenimiento preventivo.

La irrupción de partículas sólidas en el sistema respiratorio por períodos prolongados causa irritación a nivel bronquial y alveolar.

Agua y/o vapor de agua

La presencia de agua y/o vapor de agua, en el aire respirado no tiene ninguna consecuencia fisiológica. El principal peligro radica en la acumulación de agua en el interior de los botellones, en especial los de acero, que puede causar oxidación y corrosión de las paredes y del fondo.

Purgar frecuentemente las trampas de agua de cada etapa del compresor, durante la operación de recarga de los botellones y, el correcto mantenimiento preventivo de los filtros y las mismas trampas de agua, son el arma para evitar es que inconveniente. El valor máximo tolerable de agua y/o vapor de agua es de 50 mg/m³.

Sabores y colores

La presencia de colores y/o sabores desagradables en el aire contenido en un botellón de buceo advierte de la necesidad de revisar profundamente el sistema de filtros del compresor, como así también la limpieza interior del cilindro.

■ Atmósfera tipo



Figura 3.7: La Atmósfera

La atmósfera tipo o atmósfera estándar, conocida como atmósfera ISA (International Standard Atmosphere), es una atmósfera teórica basada en medidas climatológicas promedio, cuyas constantes más importantes son:

- Valores en superficie al nivel del mar de:
 - ✓ Temperatura [T]: 15 °C (59 °F).
 - ✓ Presión [P]: 760 mmHg o 29,92 "Hg, equivalentes a 1.013,25 mb
 - ✓ Densidad [δ]: 1,325 kg/m³.
 - ✓ Aceleración debido a la Gravedad [G]: 9,8 m/s².
 - ✓ Velocidad del sonido [V]: 340,29 m/s.
- Gradiente térmico: 1,98 °C por cada 1.000 pies (6,5 °C por cada 1.000 m).
- Descenso de presión: 1 mb por cada 9 m, o 110 mb por cada 1.000 m, o 1" por cada 1.000 pies.

Esta atmósfera tipo definida por la OACI sirve como patrón de referencia, pero muy raramente será posible bucear en presencia de esta atmósfera estándar.

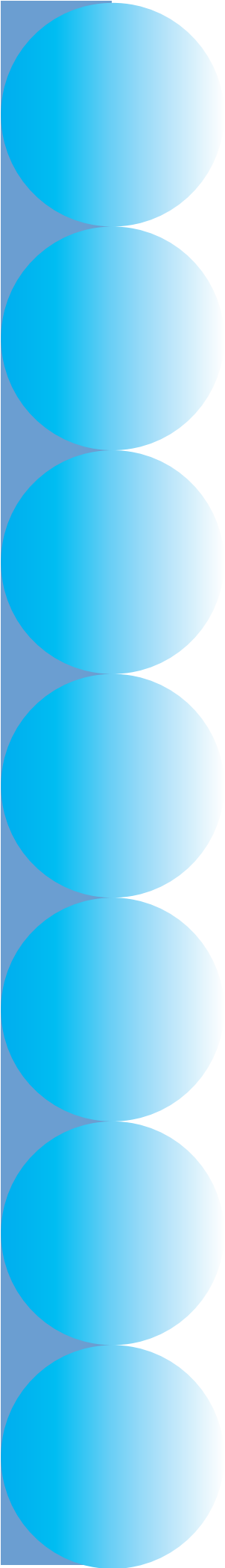
■ Resumen

- ✓ Las características básicas del aire como fluido son: Presión [P], Temperatura [T] y Densidad [δ].
- ✓ Presión Atmosférica [PA_t] es la fuerza que ejerce la Atmósfera por unidad de superficie.
- ✓ Densidad [δ] del Aire es la cantidad de Masa [M] del mismo por unidad de Volumen [V].
- ✓ Presión [P], Temperatura [T] y Densidad [δ] son inversamente proporcionales a la altura. A mayor altura [h]: menor Presión [P], menor Temperatura [T] y menor Densidad [δ].
- ✓ La Densidad [d] es inversamente proporcional a la Temperatura [T].
- ✓ A mayor Temperatura [T] menor Densidad [δ].
- ✓ La atmósfera tipo o estándar, conocida como atmósfera ISA, es una atmósfera teórica basada en medidas climatológicas PROMEDIO.

Los gases y las mezclas gaseosas

4





Los gases y las mezclas gaseosas

Introducción al conocimiento de los gases

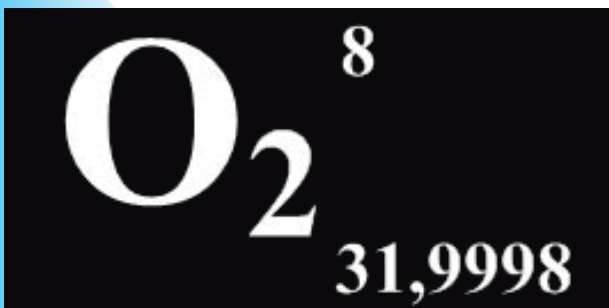
Durante tres o cuatro siglos, muchos científicos han estudiado los gases y su comportamiento, con el objeto de medir y establecer parámetros y conductas que los caractericen. Así se, midió el Peso Atómico de cada gas, el cual se expresa en Átomo Gramo y se definió el Mol como: 1 Mol de la masa de una sustancia es igual a M átomos gramo; donde M es igual a su Peso molecular.

Se determinó que 1 Mol, contiene un número de moléculas igual al Número de Avogadro ($6,024 \times 10^{23}$) moléculas. Por ejemplo: 1 mol de Oxígeno (O_2), cuyo Peso Molecular es 32, contiene el mismo número de moléculas que el Nitrógeno (N_2), cuyo Peso Molecular es 28 átomos gramo. El concepto de Mol es importante porque 1 Mol de cualquier gas, ocupa siempre el mismo Volumen (22,4 litros)

GAS	SÍMBOLO QUÍMICO	COLOR
Aire		Verde
Argón	Ar	Verde Oscuro
Dióxido de Carbono	CO_2	Gris
Helio	He	Marrón
Hidrógeno	H_2	Rojo
Monóxido de Carbono	CO	Amarillo
Neón	Ne	Verde Intenso
Nitrógeno	N_2	Negro
Oxigeno	O_2	Blanco

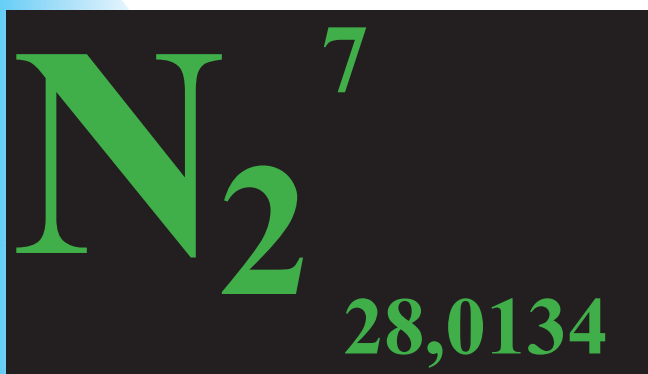
Tabla 4.a: Símbolos Químicos y Código de Colores

Los gases



El Oxígeno (O_2), es el más importante de todos los gases, pues es indispensable para el soporte de la vida, es un elemento muy abundante en la naturaleza, constituye en total el 49.5% de la corteza terrestre. En estado libre se halla formado por una molécula diatómica por dos moléculas de O_2 , que constituyen el 20,946% en volumen libre de la masa total del aire.

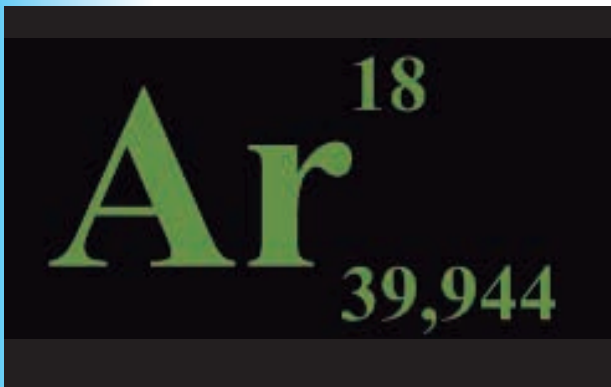
Es un gas incoloro, insaboro e inoloro. Combinado, forma parte de numerosos minerales, el agua y todos los seres vivos y plantas, sin el cual no podrían vivir, porque es el principal interviniente en los procesos metabólicos. También, es utilizado por las plantas en el proceso de la fotosíntesis. Se combina con numerosos elementos, y el fuego no arde sin su presencia.



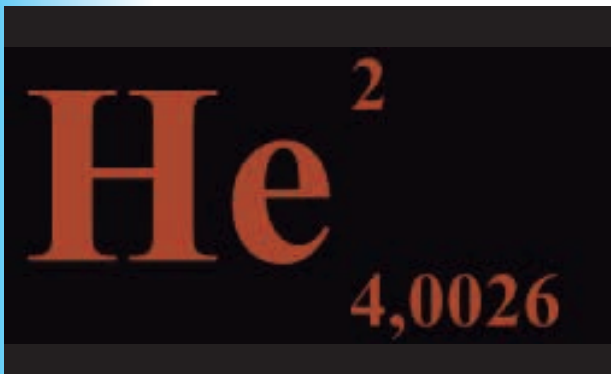
El Nitrógeno (N_2), es el gas más abundante en la naturaleza alcanzando el 78,084% de su volumen. Combinado se halla formando compuestos nitrogenados y, en los seres vivos se lo encuentra como parte de las proteínas. Como es un gas altamente estable y, no interviene en los procesos metabólicos, a pesar de que se halla presente en todo momento del proceso respiratorio, se puede decir que el Nitrógeno (N_2), es el vehículo del Oxígeno (O_2), en este proceso. Es un gas incoloro, insaboro e inoloro y no interviene en los procesos de combustión.



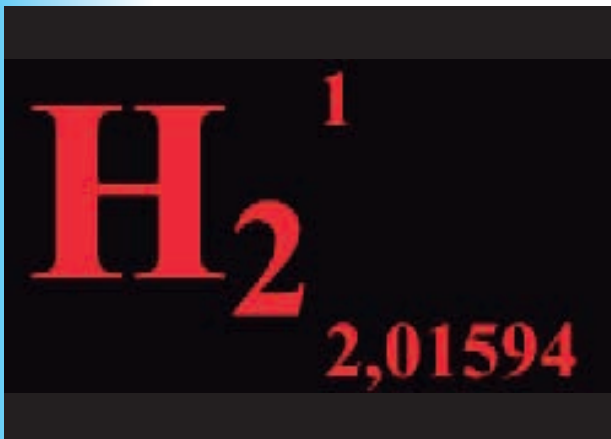
El Dióxido de Carbono (CO_2), es producido por los procesos metabólicos, en el interior del cuerpo de los seres vivos, se forma por la oxidación del Carbono (C) al producirse energía, tiene la misión fundamental de regular la respiración a través de la activación de los centros nerviosos. También, lo utilizan las plantas en el proceso de la fotosíntesis. En pequeñas proporciones es incoloro, insaboro e inoloro, pero en concentraciones mayores presenta sabor ácido y olor. Puede ser observado en las burbujas de las bebidas gaseosas y es muy utilizado como agente de extinción del fuego. En estado natural se encuentra presente en el aire atmosférico, en 0,033% de su volumen, en altas concentraciones es un gas extremadamente tóxico, y su manejo incorrecto trae graves consecuencias en los buzos que utilizan equipos de circuito cerrado.



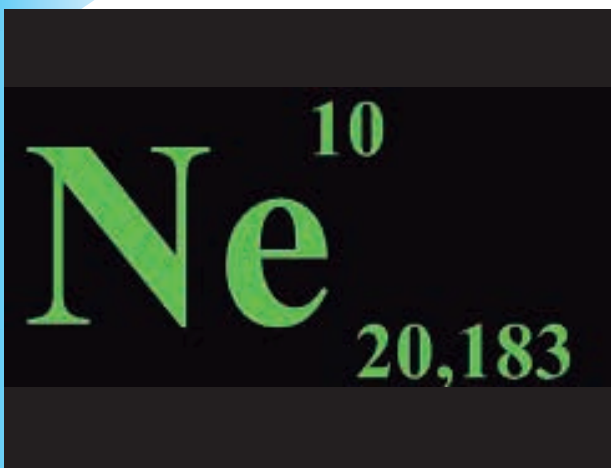
El Argón (Ar). Para 1.785, Cavendish ya sospechaba de la existencia de este gas, cuyo descubrimiento fue anunciado en el mes de agosto de 1.894 por Ramsay y Rayleigh. Es un gas noble, incoloro, inerte y monoatómico. En la atmósfera se halla en muy pequeños volúmenes y se obtiene por el proceso de destilación fraccionada a partir del aire líquido. Se utiliza para la fabricación de lámparas y en luminotecnia por su particularidad de emitir luz azul y en la industria para el proceso de soldadura de arco en atmósfera inerte. Por su bajo índice de conductividad térmica, menor al del Nitrógeno (N_2) y del Oxígeno (O_2), en buceo se lo utiliza dentro de los trajes secos con lo cual se consigue mejorar hasta en un 25 % su eficiencia.



El Helio (He), fue descubierto en 1.868 a través de estudios espectrográficos del Sol, del cual proviene su nombre (Helium, en griego), y en 1.895 fue aislado por primera vez en experimentos de laboratorio. En la naturaleza coexiste con el gas fósil, junto al cual fluye de los pozos de petróleo, USA, Canadá y la URSS, son los principales productores del mismo. Está constituido por una molécula monoatómica, es incoloro, insaboro e inoloro, y se lo considera totalmente inerte y es virtualmente insoluble en el agua. Es aproximadamente siete veces más liviano que el aire y antiexplosivo, por lo cual se lo utiliza para elevar las naves aerostáticas y dirigibles, por lo cual fue considerado como un material estratégico por muchos años. En el buceo se lo utiliza para reemplazar al Nitrógeno (N_2), en mezclas gaseosas pues no presenta problemas asociados con la narcosis como este, pero tiene la desventaja que distorsiona la voz produciendo el efecto “Pato Donald (Donald Duck)”, y que por contar con una alta conductividad térmica causa una rápida pérdida de calor corporal.



El Hidrógeno (H), está formado por una molécula biatómica, es incoloro, insaboro e inoloro y es muy raro encontrarlo en estado libre en la tierra, pero es muy abundante en el sol y en estrellas cuya atmósfera es de este gas, es aproximadamente ciento cincuenta veces más liviano que el aire, por lo cual al igual que el Helio [He] se lo utilizó para elevar las naves aerostáticas y dirigibles, su gran contra es que combinado con muy bajas cantidades de Oxígeno [O₂] forma mezclas altamente combustibles y explosivas. En la actualidad se está utilizando este gas como combustible en motores de explosión, pues prácticamente no produce residuos contaminantes y no se agotaría con un uso intensivo. En el buceo se lo utiliza como reemplazo del Nitrógeno (N₂) por las mismas razones que el Helio [He], pero la peligrosidad de su manejo limita sus aplicaciones.



El Neón (Ne) es un gas inerte cuya molécula es monoatómica, es incoloro, insaboro e inoloro, es un excelente conductor de la electricidad y excitado cambia de color (rojo-naranja). Al igual que el Helio [He], no presenta efectos narcóticos y a diferencia de este tiene una conductividad térmica baja y no distorsiona la voz, por lo cual se están realizando diversos experimentos tendientes a su utilización en el buceo.



CO

28,0106

El Monóxido de Carbono (CO), es un gas que no se encuentra en la naturaleza, es un contaminante atmosférico producido por la actividad humana, es el resultado de la combustión incompleta de los combustibles líquidos. Su molécula biatómica, es altamente tóxico para el hombre, al ser incoloro, insaboro e inoloro solo se detecta con equipamiento especializado, lo que lo convierte potencialmente muy peligroso. El Monóxido de Carbono [CO], se combina con gran facilidad con la hemoglobina bloqueando el transporte de Oxígeno [O] por parte de la sangre. El típico problema que presenta este gas en las actividades de buceo es cuando por mal funcionamiento o manejo de los compresores es introducido en los botellones junto al aire.

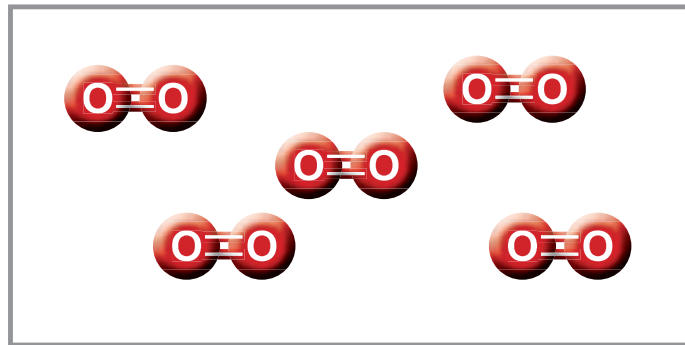


H₂O

18,0153

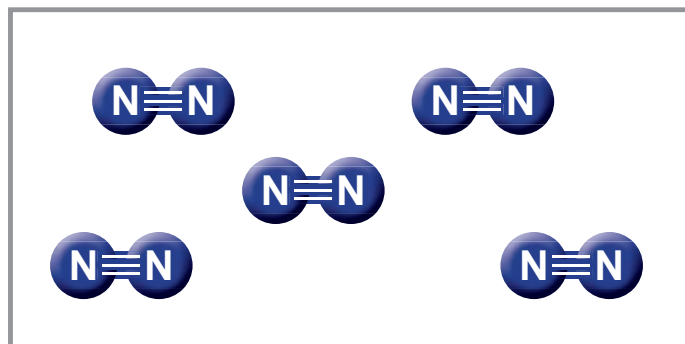
El Vapor de Agua [H₂O], está contenido en diferentes proporciones en el aire atmosférico y es considerado un gas presente en esta. Es normal encontrar en los reportes climáticos el porcentaje de humedad relativa en la atmósfera, pues indica el grado de confort esperado. El concepto de humedad es importante comprender pues, tiene incidencia en las operaciones de buceo. El efecto más común y conocido, de la presencia de vapor de agua en el aire es el empañado del cristal de la luneta. Pero el Vapor de Agua, acarrea otros inconvenientes tales como su condensación en el interior de los botellones y a nivel fisiológico puede causar irritación de los senos paranasales y las vías aéreas. Como se halla presente en los alvéolos con un volumen importante, los algoritmos matemáticos para el cálculo de la descompresión más avanzados, incluyen la Presión Parcial del Vapor de Agua [PpH₂O] en su proceso de cálculo.

OXÍGENO [O₂]



+

NITRÓGENO [N₂]



↓

NITROX

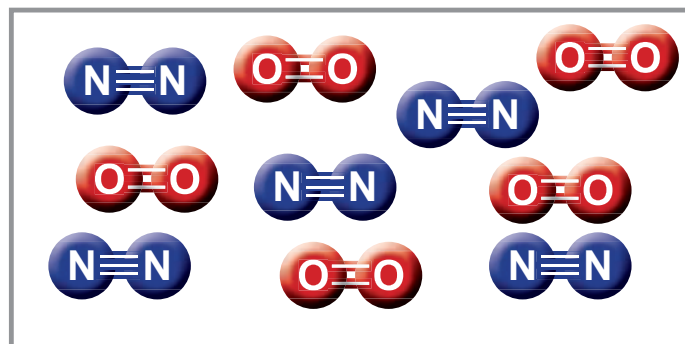
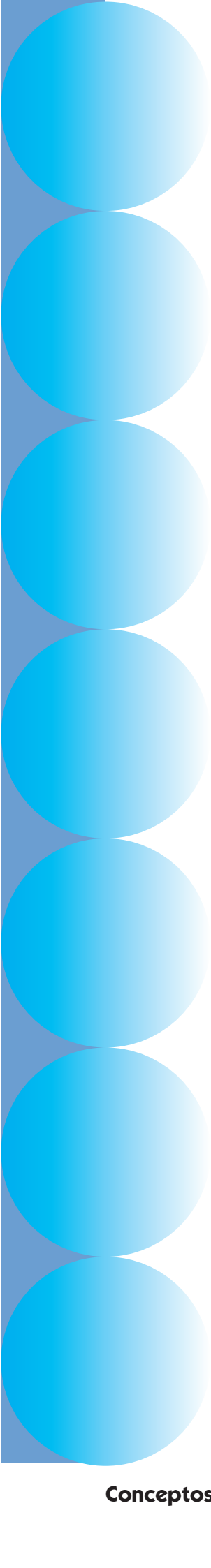


Figura 4.6: Mezcla Nitrox



Como todo animal terrestre el hombre requiere de Oxígeno [O_2], para sostener las funciones básicas de la vida. Al inspirar Aire Atmosférico, el Sistema Respiratorio extrae una fracción del Oxígeno [O_2] para ser utilizado por el metabolismo, así nuestro cuerpo convierte los alimentos en energía y, gracias a esta realizamos las tareas que a diario nos proponemos.

Como en todo proceso existen desechos o subproductos, en el caso de los procesos metabólicos del humano, uno de estos desechos o subproductos es el Dióxido de Carbono [CO_2], el cual es eliminado del cuerpo cuando exhala.

Por lo tanto, la principal función del sistema respiratorio es la provisión de Oxígeno [O_2] y la eliminación del Dióxido de Carbono [CO_2].

A diferencia de los peces, los seres humanos como mamíferos terrestres no poseemos agallas, esto quiere decir que no somos capaces de extraer el Oxígeno [O_2] del agua, nuestro sistema respiratorio está diseñado y adaptado para respirar solamente gases. Por otro lado, en comparación con los mamíferos acuáticos, nuestro tiempo de apnea es extremadamente corto 3 a 4 minutos, para una persona normal.

Por lo tanto, la primera gran dificultad para permanecer sumergidos por largos periodos de tiempo es suministrarle a nuestro organismo de todo el Oxígeno [O_2] que necesita.

La segunda barrera a sortear para poder explorar las profundidades, es mucho más compleja y difícil que la primera. Proviene de los efectos que los diferentes gases que respiramos, tienen sobre el organismo humano cuando sus proporciones varían respecto de aquellas que naturalmente se encuentran en el aire o, cuando a presión ambiente (Presión Absoluta [PAb]) es incrementada respecto de la Presión Atmosférica [PA_t].

El Oxígeno [O_2] es el único gas que nuestro organismo requiere para vivir, ante una falta o disminución considerable en su cantidad del mismo sucumbiríamos en pocos minutos. Paradójicamente un exceso de Oxígeno [O_2] también es nocivo para el organismo, produciéndose como ya se verá, una serie de graves alteraciones.

El aire fue la primera mezcla de gases que los pioneros de las inmersiones tenían a su alcance, pero con el avance de las exigencias tecnológicas y las investigaciones tendientes a minimizar los diferentes efectos del Nitrógeno (N_2), los científicos comenzaron a estudiar dos caminos:

Reducir la cantidad de Nitrógeno (N_2).

Sustituir el Nitrógeno (N_2), por otro gas con menor toxicidad y, mayor facilidad de liberación por parte de los tejidos.

Para de Buceos de Saturación, se disminuye la proporción de Oxígeno [O₂] en las mezclas para neutralizar los efectos nocivos de este sobre el organismo, cuando su Presión Parcial y Tiempo de Exposición alcanza valores críticos.

El Aire puede ser considerado una mezcla Nitrox [Oxígeno [O₂] = 21% + Nitrógeno (N₂) = 79%]. Desde este punto de vista, el aire es entonces la mezcla normal o de referencia, a partir de esta a las diferentes mezclas que se las llama:

1. **Mezclas Hipoxigenadas:** que son aquellas que contienen menos de un 21 % de Oxígeno [O₂],
2. **Mezclas Hiperoxigenadas:** que son aquellas que contienen más de un 21 % de Oxígeno [O₂].

Además, las mezclas gaseosas para el buceo pueden fabricarse con diferente número de componentes:

- ✓ Mezclas de dos componentes:
 - Nitrox: Oxígeno (O₂) + Nitrógeno (N₂).
 - Heliox: Oxígeno (O₂) + Helio (He).
 - Argox: Oxígeno (O₂) + Argón (Ar).
- ✓ Mezclas de tres componentes o Trimix:
 - Oxígeno (O₂) + Nitrógeno (N₂) + Helio (He).
 - Oxígeno (O₂) + Nitrógeno (N₂) + Argón (Ar).

De todas estas mezclas, en el ámbito del Buceo Deportivo en estos momentos se está usando cada vez con más asiduidad las Mezclas Hiperoxigenadas de dos componentes Nitrox. Las mezclas Nitrox, también son denominadas como “Enriched Air” y “EAN” (Enriched Air Nitrox), es decir “Aire Enriquecido con Oxígeno”, por la forma en que se realiza la mezcla o “Blend”, que consiste en agregarle al aire en el botellón determinadas cantidades de Oxígeno (O₂) puro.

Las dos mezclas Nitrox más utilizadas se las llama:

- ✓ **Nitrox I: EAN 32** = compuesta por, Nitrógeno (N₂) = 68% + Oxígeno (O₂) = 32%
- ✓ **Nitrox II: EAN 36** = compuesta por, Nitrógeno (N₂) = 64% + Oxígeno (O₂) = 36%

El fabricar y utilizar mezclas con un menor porcentaje de gas inerte [Nitrógeno (N₂)], como las mezclas Nitrox, tiene consecuencias directas sobre el organismo, por lo tanto, presentan ventajas y desventajas cuando se las utiliza en las inmersiones, el siguiente cuadro sinóptico muestra ambas:

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Mayores Tiempo de Fondo [TF].	Mayor riesgo de Intoxicación por Oxígeno (O ₂). Incrementa el riesgo de intoxicación del sistema nervioso central (Efecto Paul Bert).
Menores Tiempos de Descompresión [TD].	Mayor Riesgo de Neurotoxicidad. En las inmersiones de larga duración con Nitrox, aumenta el riesgo de toxicidad pulmonar del oxígeno (efecto Lorein-Smith).
Menor riesgo de Narcosis Nitrogenada.	Necesidad de controlar las Presiones Parciales de dos gases
Menor riesgo de la Enfermedad Descompresiva (E.D.)	Es una mezcla más cara (que el aire).
Reduce el nitrógeno residual, después de la inmersión	En mezclas con más de un 40% de oxígeno, se requiere equipo especial y limpieza especial, para evitar la posibilidad de incendio e incluso una explosión.
Fácil de fabricar.	
Existencia de gran cantidad de tecnología.	
Facilidad de capacitación y entrenamiento.	
Facilidad para obtener aire libre de impurezas.	
Facilidad de comprar Oxígeno medicinal.	

Tabla 4.d: Ventajas y desventajas de las mezclas Nitrox

El agua



El AGUA [H₂O], del latín Aqua, es un líquido extraordinario que ha permitido a la vida evolucionar sobre la Tierra, junto con el fuego y el aire, la tierra era considerada en la antigüedad como el cuarto elemento.

A mediados del siglo XIX, Henry Cavendish la obtuvo al quemar el Hidrógeno [H] en el aire y poco después, Antoine Lavoisier, demostró que está constituida por dos átomos de Hidrógeno [H] y un de Oxígeno [O₂] que forman una molécula. La estructura de esta, hace que las moléculas de agua se atraigan y estrechen entre sí, permaneciendo en estado líquido en condiciones ordinarias de temperatura y presión. El Agua [H₂O], es un compuesto muy estable que requiere del aporte de gran cantidad de energía para descomponerse.

El Agua, es un líquido inoloro, insípido e incoloro en pequeñas cantidades y azulado o verdoso en grandes masas. Su Peso Específico es 11,0 a 4 °C, a Presión Atmosférica normal su Punto de Ebullición es 100 °C y su Punto de Fusión 0 °C. El estado puro del agua, solo se obtiene por el proceso de destilación.

Ciclo del agua

El volumen total de agua en nuestro planeta es constante, por la cual se la considera un recurso no renovable, de aproximadamente 1.500 millones de metros cúbicos, que cubren 2/3 de su superficie y contiene aproximadamente 176 millones de toneladas de sales y minerales.

La masa de agua contenida en nuestro planeta sufre un ciclo bien estudiado llamado Ciclo del Agua, que es el siguiente: debido a la evaporación de los mares, lagos y ríos, el aire contiene más o menos cantidad de ella en forma de vapor (humedad del aire), cuando el aire se enfría el vapor se condensa y el agua precipita en forma de lluvia, nieve o gránizo, un porcentaje del agua de lluvia vuelve a caer sobre el mar, lagos, o ríos, otra parte circula por los terrenos formando ríos y torrentes que desembocan en los lagos o mares, y una gran cantidad de ella se infiltra en la tierra formando corrientes y lagunas subterráneas que más tarde afloran en manantiales.

Dos propiedades físicas muy importantes del agua de mar son la SALINIDAD y la TEMPERATURA, las cuales determinan la DENSIDAD del agua.



Figura 4.7: Ciclo del Agua.

La salinidad

El Agua [H₂O] de procedencia natural contiene gran cantidad de sales y se reconocen dos tipos de aguas.

La diferencia fundamental entre el agua dulce de los ríos y lagos y el agua de mar es su contenido en sales. Se entiende por salinidad a la concentración de sales disueltas en el agua oceánica. Aunque podemos generalizar que la salinidad ronda el valor de 35 gramos por kilogramo de agua (35 partes por mil), esta cifra experimenta variaciones en diferentes partes del mundo.

La evaporación abundante que tiene lugar en las regiones tropicales y subtropicales provoca una mayor salinidad del agua. La abundancia de precipitaciones e inundaciones en otras regiones reduce el nivel de salinidad.

La sal más abundante es el cloruro de sodio (sal de mesa), pero existen otras sales que se presentan en concentraciones menores pero muy significativas.

Densidad del agua

Densidad absoluta

La Densidad o Densidad Absoluta, es la magnitud que expresa la relación entre la masa y el volumen de una sustancia.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Su unidad en el Sistema Internacional es kilogramo por metro cúbico [kg/m³], aunque frecuentemente también es expresada en gramo por centímetro cúbico [g/cm³] o en gramo por litro [g/l].

El agua salada que en su gran mayoría forma los mares y el agua dulce que se encuentra en los ríos y lagos. La primera debe su nombre a la gran cantidad de sales disueltas por lo que es 1,026 veces más densas que la segunda.

A nivel del mar el agua es 800 veces más pesada y densa que el aire, por lo cual presenta una resistencia dinámica 800 veces superior a este, cuando un buzo se desplaza en su seno.

Distintos tipos de agua

Los distintos tipos de agua, se definen de acuerdo al contenido en sal que posea cada una de ellas.

Por ejemplo, 28,3 L de Agua Salada pesan 29.029,9 gr, mientras que 28.3 L de Agua Dulce pesan 28.304,1 gr. Por lo tanto, a igual volumen de agua, la de mar es más densa.

La siguiente tabla muestra su clasificación y contenido en sal:

TIPOS DE AGUAS	SALINIDAD	DENSIDAD (1 atm/4 °C)	DENSIDAD (1 atm/20 °C)
Agua Destilada	0 g/l	1 kg/l	0,998 kg/l
Agua Dulce	3 g/l	1,002 g/cm ³	0,9982 kg/l
Agua Salada	33 - 37 g/l	1,020 / 1,029 kg/l	1,020 a 1,029 kg/l

La temperatura

El agua se desplaza por diferencia de densidad. Las aguas más frías son más densas y tienden a hundirse, mientras que las aguas más cálidas son menos densas tienden a ascender. Así se generan corrientes verticales, que unidas a desplazamientos horizontales producen las Corrientes Oceánicas, estos últimos son generadas principalmente por el accionar de los vientos y el giro de la Tierra.

Las Corrientes Oceánicas trasladan grandes cantidades de calor de las zonas ecuatoriales a las polares. Unidas a las corrientes atmosféricas son las responsables de que las diferencias térmicas en la Tierra no sean tan fuertes como las que se darían en un planeta sin atmósfera, ni hidrosfera. Por esto su influencia en el clima es tan notable.

El agua posee una gran capacidad de absorber calor, por lo tanto, la temperatura del agua del mar varía entre valores más estrechos que la temperatura en la tierra. Las aguas de los océanos sirven de regulador térmico gracias a su gran poder termoestabilizante.

En general, la temperatura del agua disminuye con la profundidad y se pueden establecer tres zonas:

- ✓ Capa de Mezcla que abarca los primeros metros y es la zona donde la columna de agua se ve afectada por la acción de los vientos.
- ✓ Termoclina, inmediatamente por debajo de la Capa de Mezcla, donde se produce un fuerte descenso de la temperatura hasta la Capa Profunda.
- ✓ Capa Profunda donde la temperatura se estabiliza y aunque sigue disminuyendo, lo hace de forma muy suave.

En cualquier caso, los espesores de estas capas son relativos y pueden variar sensiblemente de un área a otra e incluso, en un mismo lugar, variar estacionalmente dando lugar a lo que se conoce como termoclina estacional.

El movimiento del agua

Un factor muy importante a tener en cuenta a la hora de bucear es el movimiento del agua del mar, básicamente olas, corrientes costeras y mareas.

Las olas se forman por los vientos que barren la superficie de las aguas. Mueven al agua en forma circular o de cilindro, sin desplazarla hacia adelante, pero cerca de la costa ese cilindro roza en su parte baja con el fondo iniciando una inclinación que acaba desequilibrando la masa de agua, produciéndose la rotura de la ola, perdiendo parte de su energía, que es utilizada para remover, erosionar o transportar los materiales del fondo.

Las olas aumentan su tamaño en relación directa con la velocidad del viento, con la duración temporal del mismo y con la distancia recorrida en mar abierto antes de encontrar el obstáculo de una costa.

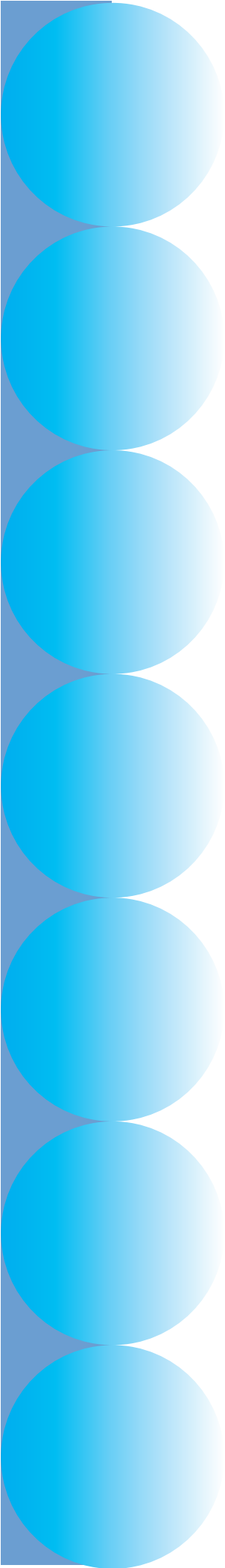
Además de las grandes corrientes marinas originadas por los vientos superficiales, y sus efectos sobre el planeta, en la cercanía del litoral se suelen producir corrientes costeras de deriva, muy variables según la forma de la costa y las profundidades del fondo, que tienen mucho interés en la formación de playas y otras formas de modelado costero.

Las mareas son fenómenos diarios que en nuestras costas ocurren dos veces al día, dos mareas altas y dos bajas. Se producen por el efecto de atracción que generan los cuerpos celestes Luna y Sol, sobre las grandes masas de agua. La Luna, por estar más cerca de la Tierra que el Sol, influye más sobre las mismas, pero, cuando ambos astros están alineados, las atracciones se suman por lo que resultan las mareas más altas y más bajas de lo normal.

La energía liberada por las olas en el choque continuo con la costa, las mareas y las corrientes tienen una gran importancia porque erosionan y transportan los materiales costeros, hasta dejarlos sedimentados en las zonas más protegidas.

Propiedades del Agua - Unidades SI

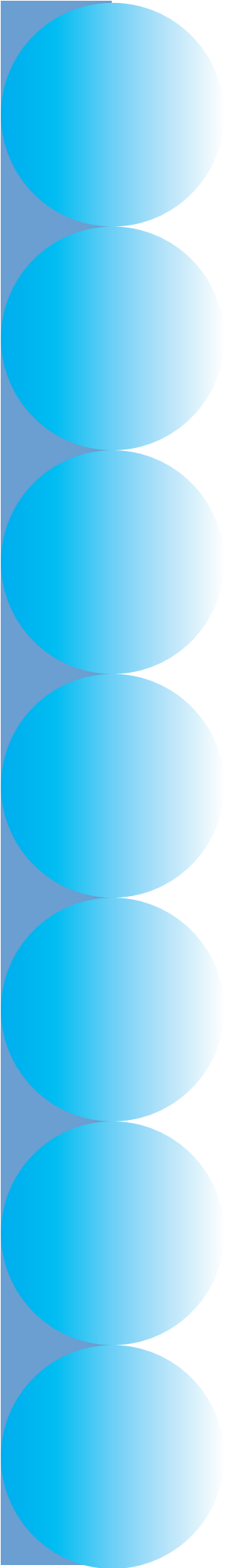
Temperatura	Densidad ρ	Viscosidad μ	Viscosidad Cinemática ν	Tensión Superficial	Presión de Vapor	Módulo de Volumen
°C	kg/m ³	N · s/m ²	m ² /s	N/m	kPa	Pa
0	999.9	1.792 3 10 ⁻³	1.792 3 10 ⁻⁶	0.0762	0.610	204 3 107
5	1000.0	1.519	1.519	0.0 754	0.8 7 2	206
10	999.7	1.308	1.308	0.0748	1.13	211
15	999.1	1.140	1.141	0.0741	1.60	214
20	998.2	1.005	1.00 7	0.0 736	2.34	220
30	995.7	0.801	0.804	0.0 718	4.24	223
40	992.2	0.656	0.661	0.0701	3.38	22 7
50	988.1	0.549	0.556	0.0682	12.3	230
60	983.2	0.469	0.4 77	0.0668	19.9	228
70	9 7 7.8	0.406	0.415	0.0650	31.2	225
80	9 71.8	0.357	0.36 7	0.0630	4 7.3	221
90	965.3	0.317	0.328	0.0612	7 0.1	216



Agentes físicos

5





Agentes físicos

Los Agentes Físicos son fenómenos que son percibidos por los sentidos, pero no poseen peso, ni volumen

De ellos tienen hay un grupo que tienen gran influencia en la práctica de una inmersión. Estos son:

1. El Sonido
2. El Calor
3. La Luz

El sonido



Figura 5.1: Propagación del sonido

El sonido es una onda mecánica que viaja en todas las direcciones, con una velocidad constante para cada medio. Para que el sonido pueda propagarse, debe existir una materia tanto sea esta gaseosa, como líquida o sólida, que lo transporte.

Es posible visualizar el fenómeno de propagación del sonido, a través de una analogía con lo que sucede al arrojar una piedra sobre un espejo de agua. Al golpear la piedra en el agua, las ondas que se generan viajan desde el punto de impacto, en forma de círculos concéntricos a partir de este y, pierden intensidad a medida que se alejan hasta desvanecerse. Un fenómeno similar sucede con las ondas del sonido que se propagan en forma esférica desde la fuente que lo produce, siendo de mayor intensidad en las proximidades de esta y perdiéndose al alejarse.

Físicamente se la llama Velocidad $\{V\}$, a la relación entre una Distancia o Espacio $\{E\}$, medida en metros [m], kilómetros [km], etc. y, el Tiempo $\{T\}$, medio en horas [hr], minutos [min], segundos [seg], que se tarda en recorrer dicha distancia y, su unidad de medida es: [km/hr], [m/min], [m/seg], etc.

Por lo tanto, se tiene:

$$V = \frac{E}{T} \rightarrow [km/h; m/min; m/seg]$$

de donde:

$$T \approx \frac{E}{V} \rightarrow [h; min; seg]$$

El medio donde se propaga la onda de sonido condiciona directamente su velocidad. En el caso del buceo los medios que nos interesan como principales para la propagación del sonido son el aire y el agua y, en ambos se presentan variaciones físicas que ejercerán sus efectos sobre la transmisión del sonido, de modo que la velocidad de propagación no será la misma en todas las circunstancias en un medio dado.

En el aire la transmisión de las ondas sonoras, según el estado atmosférico (presión, humedad y temperatura), puede variar de 320 a 340 m/s, tomándose en promedio 330 m/s, es decir de 1.152 a 1.224 km/h.

En el agua actúan como factores de influencia, la salinidad, la temperatura y la presión, así tenemos que el sonido puede viajar entre 1.400 m/s y 1.600 m/s, tomándose en promedio 1.500 m/s que se corresponden con 5.040 y 5.760 km/h, respectivamente siendo que varía directamente con la Temperatura en aproximadamente 2,5 m/°C,

Mientras que por el factor salinidad la variación de velocidad es aproximadamente de 1,4 m/s por cada 1 ‰. Inversamente por influencia de la presión la variación de velocidad es aproximadamente de 1,8 m/s por cada 10 bar (10,13 hkPa= 100 mca), con variaciones que se aprecian al realizar mediciones en situación real; por otra parte, las ondas no se transmiten de forma rectilínea, sino que se van curvando hacia la zona de menor velocidad dando lugar a múltiples reflejos en superficie (interface aire / agua) y fondo.

Veamos con un ejemplo, que sucede con esta diferencia de velocidades del sonido. Supongamos un buzo realizando una inmersión a cualquier profundidad y un buzo de seguridad en la embarcación y que a 10 km (10.000 m) del punto de buceo se produce una explosión que afecta tanto en la superficie como bajo ella. ¿Cuánto tiempo tardarán en oírla, el buzo en el fondo y su compañero en la superficie?

$$T_{\text{Fondo}} = \frac{E}{V_{\text{Agua}}} = \frac{10.000m}{1.400m / seg} = 7,14seg$$

$$T_{\text{Superficie}} = \frac{E}{V_{\text{Aire}}} = \frac{10.000m}{330m / \text{seg}} = 30,3\text{seg}$$

Es decir que, el buzo en el fondo tardará aproximadamente cuatro veces menos tiempo en percibir la explosión. Esta diferencia de velocidades, trae algunas consecuencias durante una inmersión.

El hombre adulto tiene sus orejas separadas por el ancho de su cabeza, en promedio aproximadamente 15,5 cm, al viajar una onda sonora por el aire tarda un cierto tiempo en llegar de un oído al otro, esto le da la noción de la dirección del sonido. Pero bajo el agua, la misma onda de sonido, como se ha demostrado, tarda aproximadamente 4,5 veces menos tiempo en recorrer la misma distancia. Este fenómeno da la sensación que los sonidos provienen de todas las direcciones. Por esto, provocar un ruido bajo el agua, como por ejemplo golpeando el botellón, sirve para atraer la atención del compañero, pero este debe mirar en diferentes direcciones antes de ubicar la fuente del mismo.

En superficie, la intensidad del sonido da una noción de la distancia a que se encuentra el emisor del mismo. Pero durante una inmersión, es imposible estimar las distancias, debido al alcance de los tonos que son diferentes a los del aire.

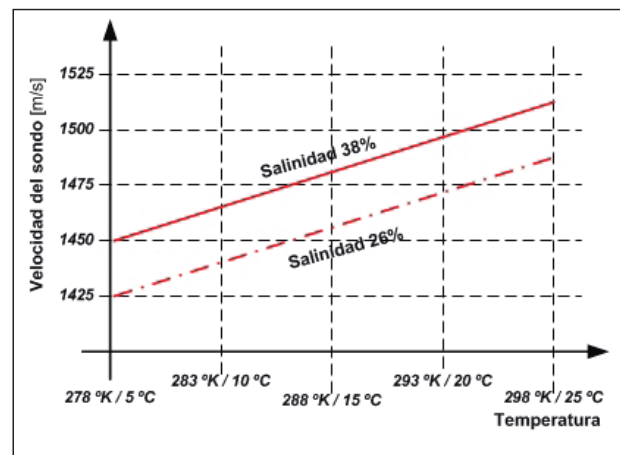
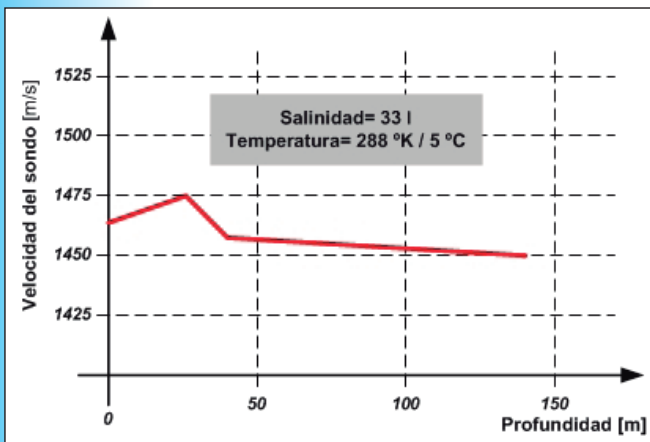


Figura 5.2 y 5.3: Transición del sonido

Bajo la superficie, se oyen sonidos provenientes de los motores de barcos y embarcaciones deportivas. Los tonos agudos, producidos por los motores Fuera de Borda, se oyen con gran nitidez, porque son generados por ondas cortas y de gran energía, pero dan la sensación de hallarse a mayor distancia de la que se realmente se encuentran.

Mientras que los tonos bajos, provenientes de motores internos tipo nafteros o Diesel, generan ondas largas y poco energéticas, que son fácilmente absorbidas por la masa de agua, por lo cual serán percibidos cuando se hallen a menos de 50 metros de distancia.

Contrariamente, los buques de gran porte como transatlánticos, cargueros, o petroleros, marcarán su presencia a varios kilómetros de distancia debido a que el gran volumen de su casco actúa como caja de resonancia y la importante superficie de contacto entre este y el agua facilitan la transmisión del sonido.

Otra particularidad es, que los sonidos producidos sobre la superficie, como gritos o ruidos, no atraviesan la misma y en viceversa sucede lo mismo.

Los gráficos que siguen describen la propagación del sonido emitido por fuente sumergida.

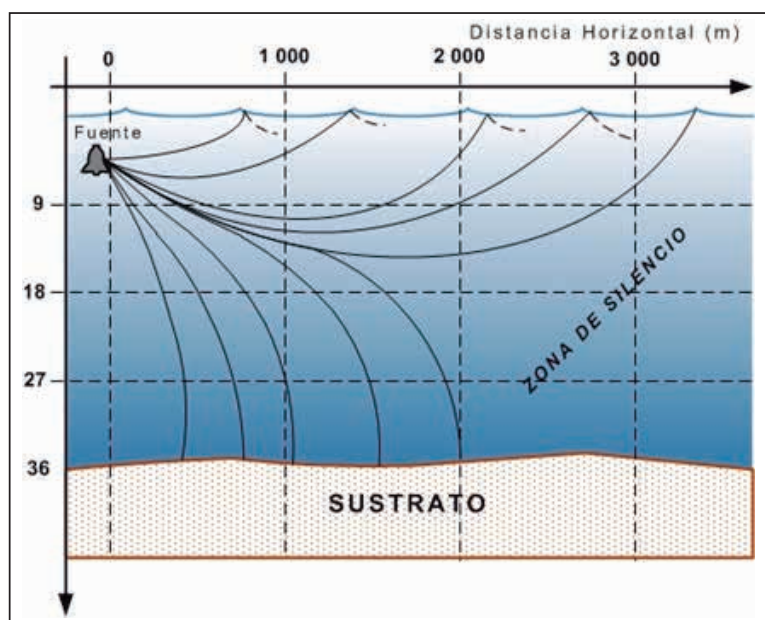


Figura 5.4: Propagación del sonido

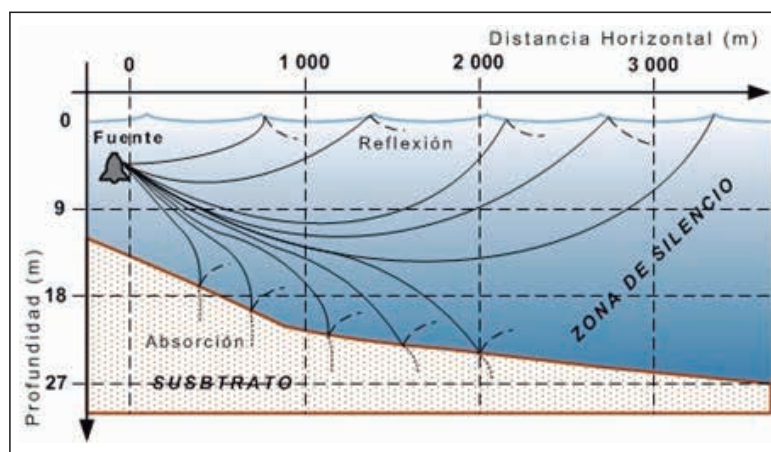


Figura 5.5: Absorción y Reflexión de las ondas sonoras

Calor y temperatura

La temperatura de un cuerpo, es una medida de su estado relativo de calor o frío. A través del tacto se puede obtener una estimación de la temperatura, pero este método es extremadamente inexacto por lo cual para su medida correcta se usa un instrumento llamado Termómetro.

Las unidades de medida de Temperatura más usuales son: el Grado Centígrado o Celsius [°C] para los países que utilizan el sistema métrico y el Grado Fahrenheit [°F] para los países anglosajones. Para pasar de una escala a otra se cuenta con las siguientes fórmulas:

Si se tiene una temperatura medida en Grado Fahrenheit [°F] y se desea convertir a Grado Centígrado o Celsius [°C] será:

$$T [^{\circ} F] = \frac{9}{5} T [^{\circ} C] + 32$$

En viceversa, para pasar de Grado Centígrado o Celsius [°C] a Grado Fahrenheit [°F] será:

$$T [^{\circ} C] = \frac{5}{9} (T [^{\circ} F] - 32)$$

Por ejemplo, si se tome una temperatura de 37 °C y se quiere conocer su valor en Grado Fahrenheit [°F], será:

$$T [^{\circ} F] = \frac{9}{5} \times 37^{\circ} C + 32 = 98,6^{\circ} F$$

En viceversa se tendrá:

$$T [^{\circ} C] = \frac{5}{9} (98,6^{\circ} F - 32) = 37^{\circ} C$$

La figura siguiente muestra las diferencias entre Grado Centígrado o Celsius [°C] y: Grado Fahrenheit [°F]

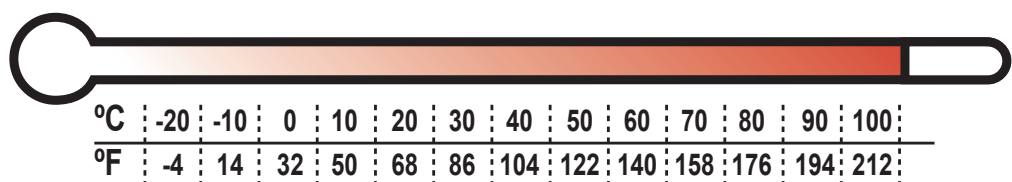


Figura 5.4: Escala de Temperaturas

■ Temperatura absoluta

El científico francés Jaques Charles, para 1.787, estudiaba la relación entre la temperatura y el volumen de una masa gaseosa, sometida a una presión constante. Sus estudios estaban dirigidos a entender cómo funcionaba las masas de aire caliente encerradas en un balón. Charles, observó que cuando la Temperatura [T] de la masa gaseosa se encontraba próxima a 0 °C, su volumen se reducía en 1/273 por cada Grado Centígrado [°C] que disminuía su temperatura. Entonces infirió que si se continuaba disminuyendo la temperatura del gas hasta -273 °C el volumen de la misma tendería a ser cero. A este valor de temperatura lo llamó Cero Absoluto.

El valor de la Temperatura Absoluta se mide en grados Kelvin [K] y, se utiliza para realizar cierto tipo de cálculo que predicen el comportamiento de una masa gaseosa, relacionado con las Leyes de los Gases.

La escala de las Temperaturas Absolutas tiene como valor cero el Cero Absoluto (0 K), que es la menor temperatura que es posible alcanzar, es decir cuando todo el movimiento de las moléculas cesa.

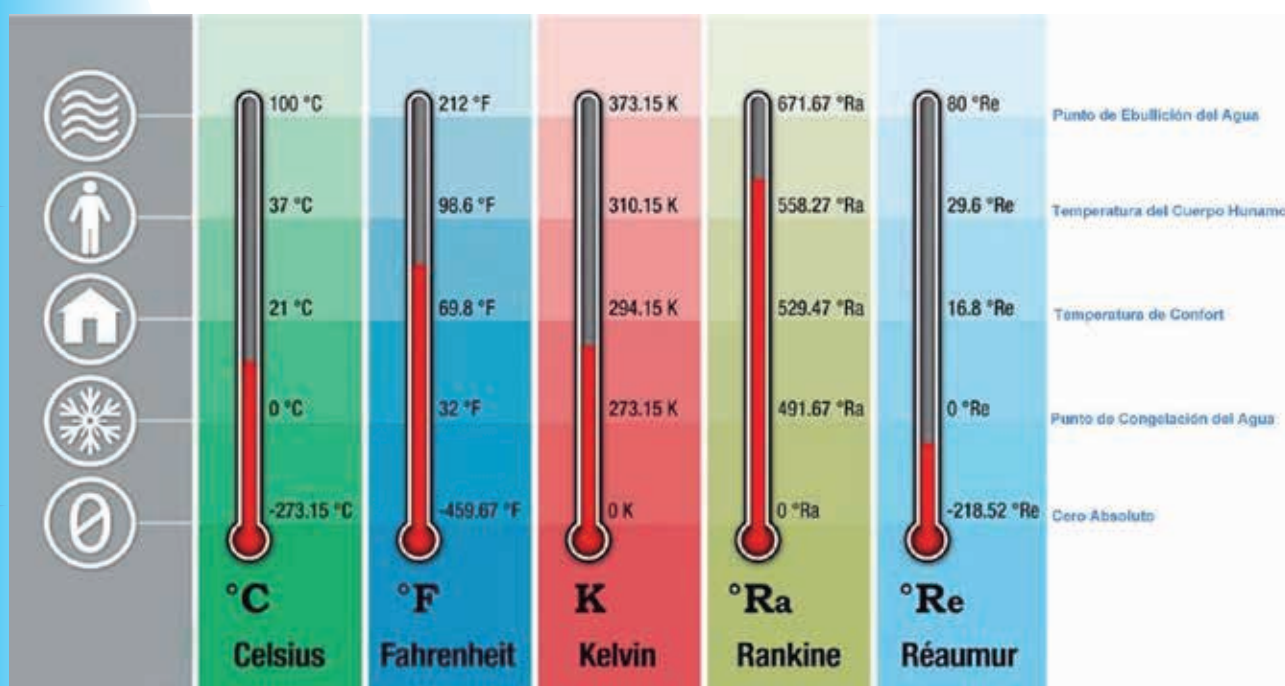


Figura 5.5: Escalas de Temperaturas Absolutas

Para convertir una temperatura expresada en grados Celsius a grados Kelvin, hay que sumarle a esta la constante 273.

$$K = ^\circ C + 273$$

Ejercicios:

1.- Si la temperatura a que está sometida una masa gaseosa es de 27°C , ¿Cuál es su temperatura absoluta?

$$T [K] = t [^{\circ}\text{C}] + 273 = 27^{\circ}\text{C} + 273 = 300 \text{ K}$$

2.- si la temperatura absoluta de un cuerpo es de 310 K. ¿Cuál es su temperatura en grados centígrados?

$$t [^{\circ}\text{C}] = T [K] - 273 = 310 \text{ K} - 273 = 37^{\circ}\text{C}$$

■ Transmisión del calor

El fenómeno de la transmisión del calor se realiza por tres mecanismos diferentes que son:

Radiación: Es la transmisión de calor por emisión desde la superficie de los cuerpos en forma de ondas electromagnéticas. Es ese este mecanismo, mediante el cual sol calienta todos los cuerpos que irradia.

Convección: Es ese el fenómeno de la propagación del calor de un punto a otro por el movimiento real de materia. Éste se verifica cuando una materia es calentada por la acción de una corriente de aire que posee una temperatura elevada

Conducción: Este de proceso se presenta cuando calor es transmitido a través de la materia sin movimiento de esta. El ejemplo clásico es cuando se calienta el extremo de una barra metálica y luego de transcurrido un breve tiempo se comienza a percibirse el calor en el otro extremo.

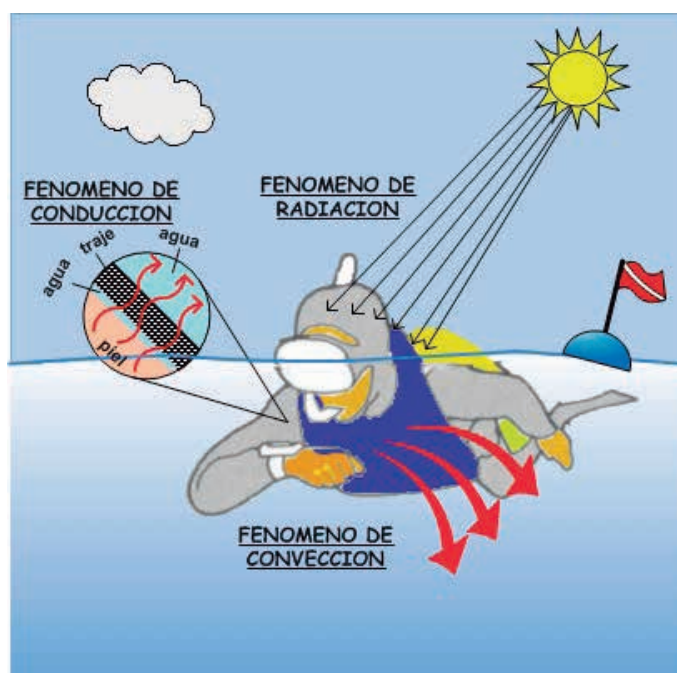
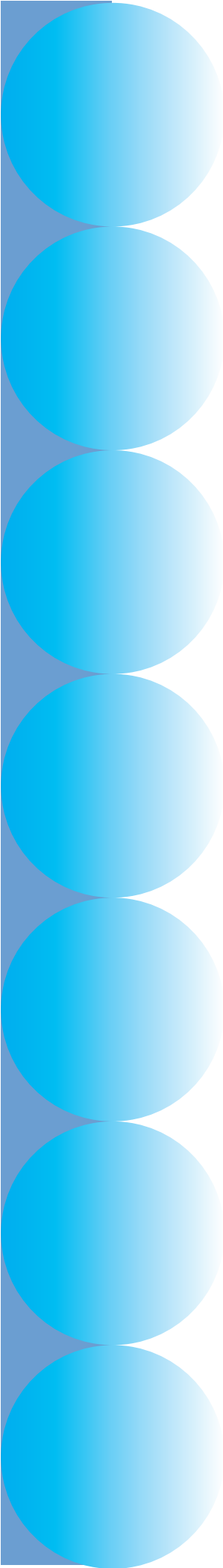


Figura 5.6: Proceso de transmisión del calor



Veamos ahora en los diferentes momentos en que se presenta el fenómeno de transmisión de calor durante una inversión. Supongamos que un buzo que se halla desplazándose por superficie, bajo estas circunstancias su espalda es calentada por el sol a través del proceso de radiación, mientras que de su traje isotérmico el calor escapa por conducción y la desplazarse y moverse el agua a su alrededor el calor es disipado por convección.

Evaporación: La pérdida de calor asociada al cambio de estado físico cuando el agua sufre la transformación de líquido a vapor, requiere una gran cantidad de energía. Como buzos, sufrimos varios procesos de evaporación que se suman para incrementar la pérdida de calor por esta causa. Durante las inmersiones respiramos aire o, mezclas de gases previamente tratados, esto implica que los gases han pasado por un proceso de purificación y deshumidificación, por lo cual su grado de humedad es muy bajo. Es decir que el aire o, la mezcla de gases a respirar es sumamente “seca”. Desafortunadamente, nuestros pulmones necesitan que el aire o, la mezcla de gases, contengan un grado de humedad determinado, este acondicionamiento se realiza a lo largo del sistema respiratorio antes de llegar a los pulmones y, el grado de humedad requerido se obtiene evaporando agua.

Este proceso implica una importante pérdida de calor. Adicionalmente a esta, se tienen otras pérdidas de calor por evaporación de agua. Una se produce dentro de nuestro traje isotérmico, todos hemos notado como se desprende vapor de nuestro cuerpo al quitarnos la chaqueta. Y otra pérdida de calor importante se registra cuando nos hallamos expuestos al viento o brisas.

El agua tiene una gran capacidad de conducción del calor. La conductividad del agua, es decir la capacidad que tiene esta de transmitir el calor, es 25 veces mayor que la del aire, por lo tanto, una persona inmersa en el agua sin protección perderá el calor de su cuerpo rápidamente.

El cuerpo humano puede considerarse como una máquina generadora de calor que regula su temperatura a 37 °C en su interior y 34 °C en su exterior sobre su piel. Mientras la temperatura corporal se halle próxima a estos valores, el cuerpo mantiene sus funciones vitales normalmente, pero si la temperatura desciende por algún motivo, el organismo reacciona para contrarrestar sus efectos, utilizando diferentes mecanismos.

Primero aumenta la actividad metabólica, por lo cual el organismo requiere de mayor cantidad de Oxígeno. Esto hace que se consuma mayor cantidad de aire, agotando más rápidamente el botellón.

Además, se produce una reducción de la circulación sanguínea por vaso constricción, en la piel, que trae aparejada una disminución de la sensibilidad del tacto, lo cual puede inducir a accidentes por cortes y, en las extremidades, que las hace más susceptibles a los calambres.

Al descenso de la temperatura corporal por debajo de los valores normales se lo llama: Hipotermia.

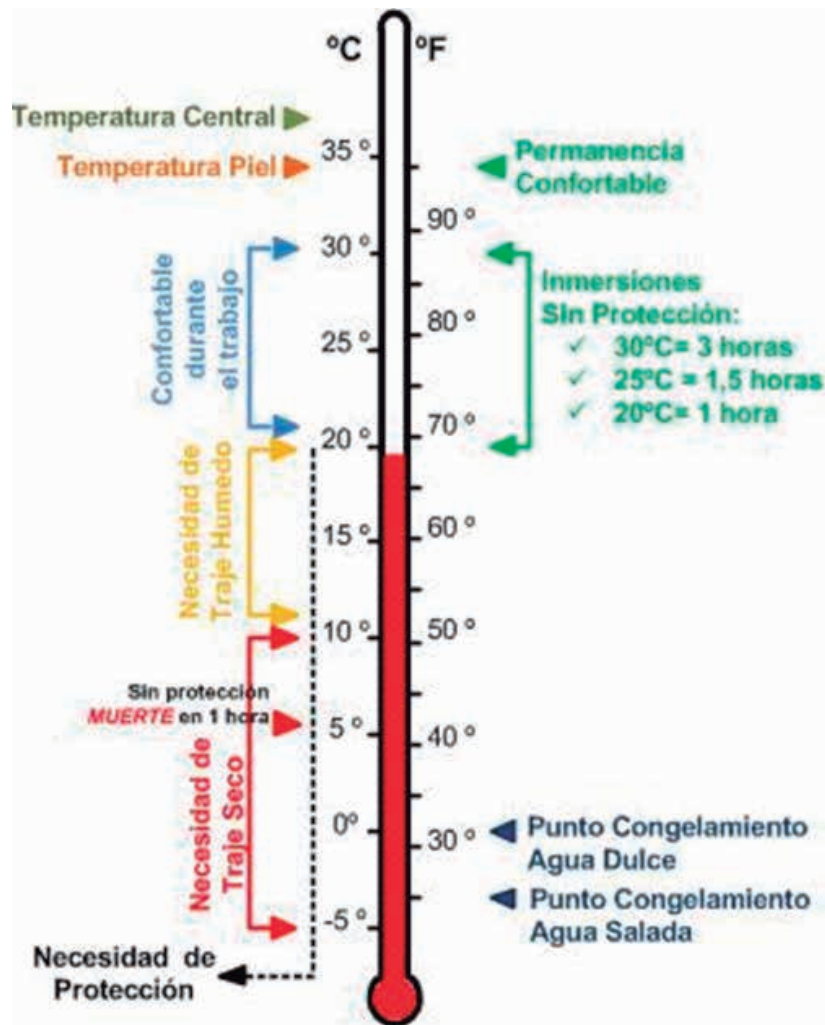


Figura 5.7: Requerimientos de protección contra el frío

Durante inmersiones prolongadas para evitarla, es imprescindible la utilización de algún tipo de protección térmica. Para aguas cuya temperatura se halle por debajo de los 21°C, se debe usar trajes isotérmicos del tipo húmedo y cuando la temperatura es próxima o inferior a los 10 °C se debe utilizar trajes isotérmicos del tipo seco.

Transformaciones adiabática

Un sistema adiabático es aquel en el cual no existe intercambio de calor. La Capacidad Calorífica (Q) de un gas ideal es igual a la cantidad de calor que hay que suministrarle a dicho gas para elevar su temperatura en un Grado Centígrado (1 °C), está definida por la siguiente ecuación:

$$Q = \ln \frac{T_2}{T_1} = -R \times \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Donde:

Q= Capacidad Calorífica a volumen constante
 T= Temperatura Absoluta en el estado 1 y 2
 V= Volumen en el estado 1 y 2

ln= logaritmo natural
 R= Constante universal de los gases

$$R = 0,08207 \frac{l \times at}{mol \times K}$$

ver: Ley General de Estado de los Gases Ideales

Esta ecuación se utiliza para calcular las variaciones de la temperatura en un sistema adiabático cuando existen cambios de volumen. Demuestra matemáticamente como se incrementa la temperatura de una masa gaseosa durante un proceso de compresión y, como esta disminuye durante una expansión.

Un ejemplo del fenómeno de Compresión Adiabática, se ve claramente durante el proceso de recarga de un botellón de buceo durante la cual la temperatura de sus paredes se incrementa notablemente por efecto del aire o mezcla gaseosa que se comprime en su interior. Este incremento de temperatura puede llegar a ser sustancialmente importante, si la compresión del aire o mezcla de gases es muy rápida.

Este concepto de Transformación Adiabático, tiene escasa importancia en el campo del buceo recreativo donde se realizan inmersiones exclusivamente con aire, pero cuando se avanza hacia el terreno del Buceo Técnico, el cual abarca inmersiones con mezclas Nitrox en las cuales la proporción de Oxígeno [O₂] es mayor a la normal (21%), comienza a tener relevancia, porque ante la presencia de algún hidrocarburo contaminante como grasas o lubricante, el incremento de temperatura y la mayor proporción de Oxígeno [O₂] presente, pueden ser el motor para el inicio de fuego y/o una explosión.

En la situación inversa encontramos el fenómeno de Expansión Adiabática, cuando se permite escapar el aire o mezcla gaseosa, en forma muy rápida del interior del cilindro de buceo, abriendo el Robinete u operando la purga del regulador. Bajo esta circunstancia, el rápido incremento del volumen se realiza a costa de la energía interna de la mezcla de gases y en consecuencia su temperatura cae.

■ Aislación térmica

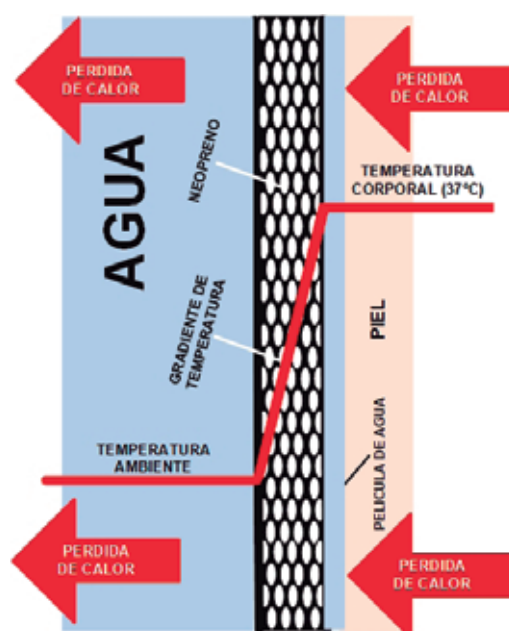


Figura 5.8: Aislación térmica

El aislamiento térmico que ofrece un traje de buceo tipo húmedo, está dado principalmente por la conductividad térmica del material con el cual está hecho, y la cantidad de agua que eventualmente penetra entre el traje y la piel del buzo. Como el espesor de dicha capa de agua es extremadamente reducido no se la considera en el cálculo del aislamiento.

Entre los años 1950 y 1951 desarrollado por Arnold Collins, apareció en el mercado el Neopreno, que es el nombre comercial del Policloropreno

Fue el primer elastómero sintético o caucho sintético de baja densidad, que tuvo éxito a nivel comercial, por ser especialmente resistente a los aceites, la intemperie y otros agentes físicos y químicos, por lo cual se ha convertido hasta el momento en el mejor material aislante para confeccionar los trajes de buceo, tipo húmedo.

El neopreno expandido es, un esponjado que cuenta con innumerables de celdas cerradas obtenidas a través de un proceso químico o, por el burbujeo de nitrógeno sobre el material cuando éste se elabora. De este modo se tiene un material de muy baja conductividad térmica y buena elasticidad.

La protección térmica que ofrece el neopreno expandido depende obviamente el espesor de la tela. En el mercado se encuentran una gama de espesores que va desde los más finos de 3 m, hasta los 12 mm. La desventaja que presenta el neopreno expandido, es que no tiene resistencia a la compresión bajo los efectos de la presión, variando sensiblemente su espesor. Por lo tanto, a cuanto mayor profundidad menor poder aislante tiene el mismo esto se me reflejado en los gráficos siguientes.

La luz

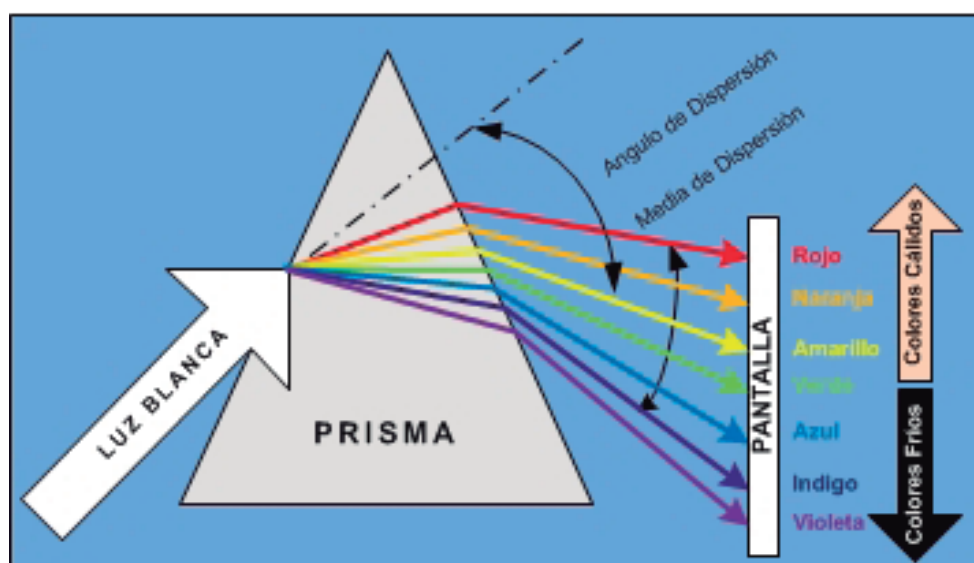


Figura 5.9: Descomposición de la Luz Blanca

La Luz es una radiación emitida por una fuente incandescente o luminiscente, que hace visibles los objetos.

Físicamente la luz es, una onda electromagnética que oscila entre los 400 y 700 nanómetros [nm]. Tal como se la percibe, se dice que la luz es blanca, pero si se hace pasar un rayo de luz por un prisma, esta se descompone en los siete colores que la componen, según sus diferentes longitudes de onda, como muestra la Figura 5.9.

A los colores así obtenidos se los clasifica en Fríos, aquellos que tienen longitudes de onda entre los 400 y 560 nm (Azul, violeta, verde) y Cálidos cuyas longitudes de onda están entre los 560 nm y 700 nm (amarillo, naranja y rojo).

La luz emitida por el Sol viaja por el vacío hasta la Tierra a una velocidad de 300.000 km/h, pasando por su atmósfera sin que se observen variaciones en su velocidad e intensidad.

Al llegar a la superficie de un espejo de agua se producen tres fenómenos, que son:

- Reflexión
- Absorción
- Difracción.

Estos fenómenos se producen simultáneamente, pero a fines de comprensión se desarrollarán por separado.

La principal característica es que la luz viaja en línea recta dentro de un medio homogéneo, como el aire o el agua pura. A la línea, que indica la dirección de la luz se la llama Rayo de Luz.

■ La reflexión

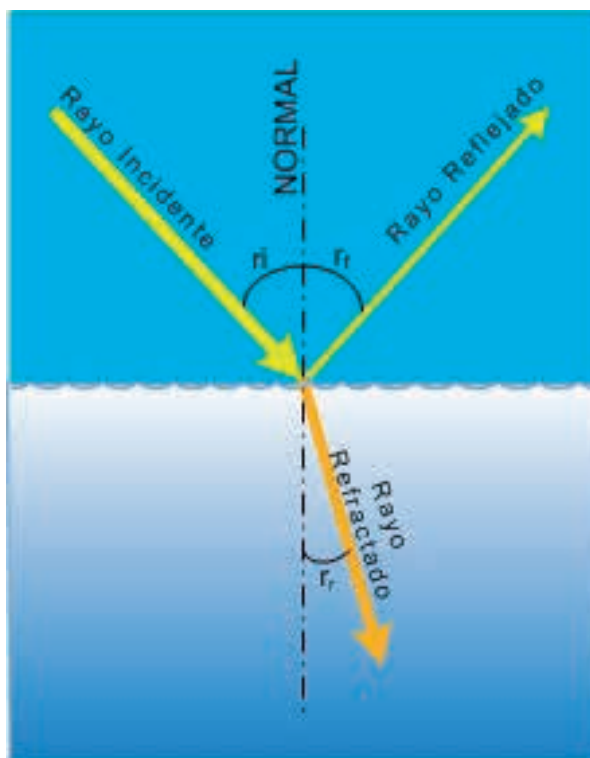


Figura 5.10: Fenómeno de Reflexión

Cuando un rayo de luz, incide sobre un espejo de agua se producen los siguientes fenómenos: parte de la luz se refleja en el espejo, es decir que es devuelta a la atmósfera, con un ángulo igual al que incide y, parte penetra el espejo refractándose, variando el ángulo con que incide.

Se demuestra que:

1.- El ángulo de incidencia [r_i], es igual al ángulo de reflexión r_f

$$r_i = r_f$$

2.- Que, al penetrar el medio, el ángulo de incidencia [r_i], varía según la densidad del medio. Tanto, en el aire, como en el agua el ángulo de refracción [r_r], es siempre es menor.

$$r_i > r_r$$

r_i	LUZ REFLEJADA
°	%
0	2.0
10	2.1
20	2.2
30	2.3
40	2.5
50	3.4
60	6.0
70	13.4
80	38.5
90	100.0

Tabla 5.a:
Cantidad de Luz según el ángulo de incidencia r_i

De 1.- se deduce que parte de la luz que incide en la superficie de un espejo de agua se pierde por reflexión y, que esto está en relación directa con el ángulo de incidencia r_i . La Tabla 5.a.-, muestra la relación entre el ángulo de incidencia [r_i] y, la fracción de luz reflejada.

En la tabla se puede observar que con ángulos de incidencia [r_i] entre 0° y 40° es cuando hay mayor penetración de luz. En la naturaleza esto se da, en las horas en que los rayos del sol llegan en forma perpendicular a la tierra, es decir entre las 11 y la 15 horas mayor cantidad de luz.

Por ejemplo: al amanecer, en las primeras horas de la mañana, la luz reflejada es aproximadamente de un 35%, a las diez de la mañana es de un 17%, a mediodía es de un 2%, a las dos de la tarde de un 17% y al atardecer de un 35%.

También habrá más luz reflejada si el mar está rizado con pequeñas olas.

■ Angulo crítico

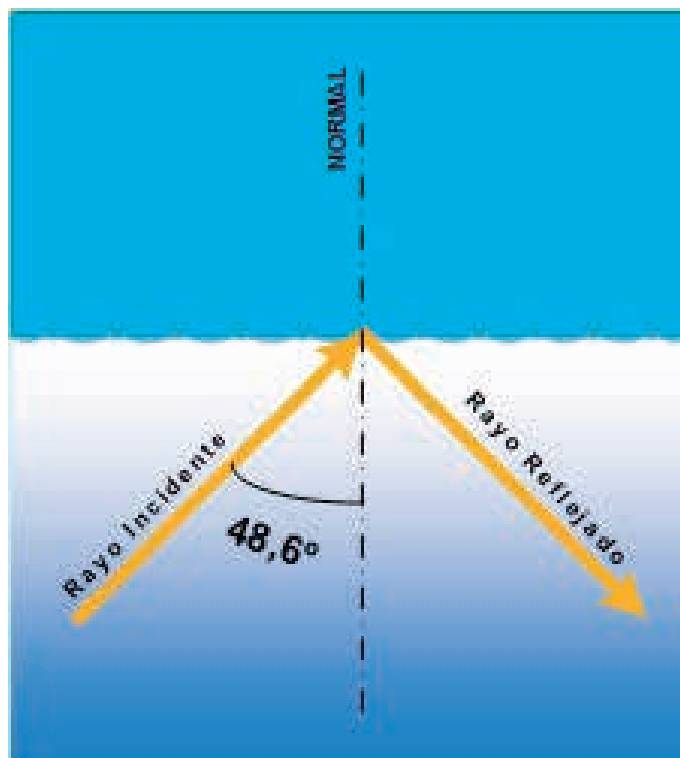


Figura 5.11: Angulo Límite o Crítico

Si se proyecta la luz de una linterna desde el fondo de un lecho hacia la superficie, siguiendo la Normal [N] al espejo de agua, se verá que la luz atraviesa este y sale a la atmósfera. Variando el ángulo, se llega a un punto donde la totalidad de la luz se refleja en la superficie y retorna hacia el fondo. A este ángulo se lo llama Angulo Límite o Crítico y, su valor es de 46.8° .

Un fenómeno similar sucede con un rayo que incide sobre la superficie del agua desde la atmósfera. Por eso, cuanto mayor es el ángulo de incidencia respecto de la Normal [N] a la superficie, mayor es la cantidad de luz reflejada y menor la cantidad que penetra bajo la superficie, esto explica la poca cantidad de luz presente durante una inmersión en las horas del amanecer o el atardecer.

Hasta este punto se ha desarrollado que sucede con un rayo de luz que incide y se refleja. Ahora se tratará que sucede con el rayo que penetra la superficie de agua.

Un rayo que penetra el espejo del agua, sufre un cambio en su dirección y, como pasa de un medio ópticamente menos denso a, uno que es más denso, entonces se acerca a la Normal [N] de la superficie, por lo tanto, el ángulo de refracción [r_r] es menor que el ángulo de incidencia [r_i]. Una vez dentro del medio el rayo de luz sufre dos fenómenos que son, una absorción y una difracción

■ La difracción

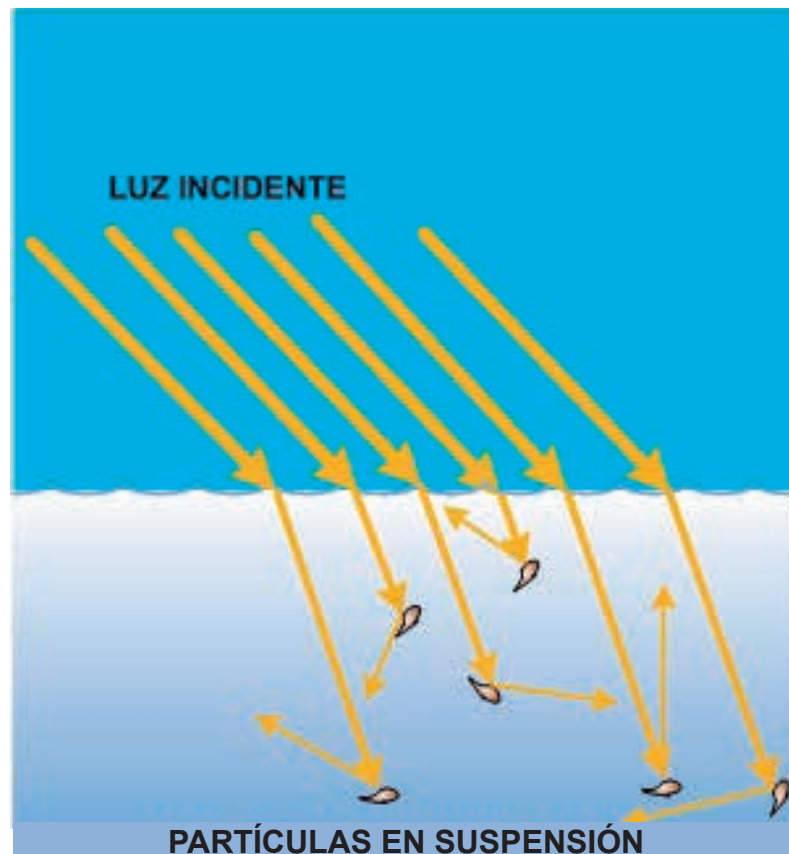


Figura 5.12 Fenómeno de Difracción de la luz

La Difracción es la disminución en la cantidad de luz por su dispersión en todas direcciones. A la difracción se la llama también difusión y, es causada por las partículas en suspensión, pues cuando los rayos de luz chocan con ellas son desviados en todas direcciones.

El efecto de las partículas en suspensión es más notorio en aguas turbias, donde aun usando iluminación artificial, en vez de mejorar el problema, empeora pues se forma una barrera de luz debido a la reflexión de los rayos en las mismas.

La absorción cromática

Es el fenómeno por el cual la luz desaparece a medida que la profundidad aumenta. Existen dos tipos de absorción:

- Absorción Cuantitativa
- Absorción Cualitativa

La Absorción Cuantitativa hace referencia a la cantidad de luz que se extingue en forma proporcional al espesor de la capa de agua que recorre el rayo.

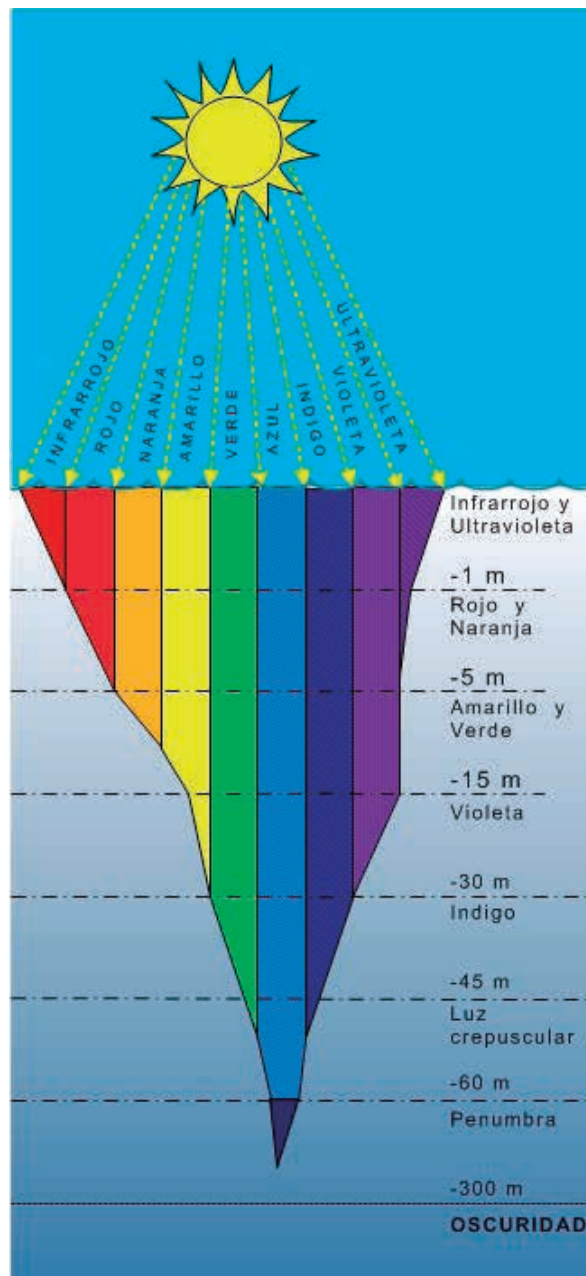


Figura 5.13: Fenómeno de Absorción

Las causas de la Absorción Cuantitativa son el agua propiamente dicha, que es constante y, las partículas en suspensión, que depende de la cantidad y tamaño de las partículas que encuentra el rayo a su paso.

La Absorción Cualitativa se produce por la desaparición de determinadas longitudes de onda, según la profundidad, por lo tanto, el agua actúa como un filtro selectivo para las diferentes longitudes de onda de la luz blanca (ver: La Luz).

Como se puede ver en la figura, los primeros colores en extinguirse son los Colores Cálidos, los cuales poseen mayor longitud de onda.

Comenzando por el rojo (6700 nm), luego el naranja y, finalmente el amarillo (6560 nm).

Luego se extinguen los Colores Fríos, primero el verde (6560 nm), siguiendo por el violeta y finalmente el azul (6400 nm).

Esta absorción de los colores, trae como resultado que el rendimiento cromático de las películas color usadas para fotografía subacuática se vea afectado, para neutralizar este efecto se recomienda utilizar flash o películas de alta sensibilidad (400 ASAS). Mientras que las películas en blanco y negro no son afectadas por este fenómeno.

■ Cantidad total de luz

Profundidad	Cantidad de Luz
- m -	- % -
0	100,00
1	40,00
5	25,00
10	14,00
20	7,00
30	3,00
40	1,50
50	0,70
60	0,25
90	0,17
100	0,00

Tabla 5.b: Cantidad total de Luz

Cuando un rayo de luz incide sobre la superficie de un espejo de agua, los tres fenómenos descritos (Reflexión, Refracción y Absorción), suceden simultáneamente. Primero, dependiendo del ángulo de incidencia, se perderá una cierta cantidad de luz por reflexión, del resto de luz que penetra el medio una parte se perderá por, refracción y otra por absorción, dependiendo estos fenómenos de la coloración del agua, de la cantidad de partículas en suspensión y, de la profundidad. La Tabla 5.b, muestra la Cantidad Total de Luz para el agua de mar, en función de la profundidad.

El ojo humano

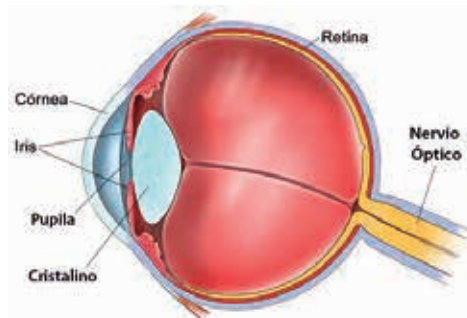


Figura 5.14: Visión en el aire. Corte del ojo

El ojo humano tiene la forma aproximada de una esfera, de 25 mm de diámetro. Por la parte delantera, tiene una curvatura mayor y se halla revestido de una membrana transparente y resistente llamada Córnea. Detrás de la córnea se encuentra el Cristalino y, entre ambos hay un líquido llamado Humor Acuoso, mientras que, por detrás del Cristalino, hay otro líquido llamado Humor Vítreo, ambos humores tienen un índice de refracción similar al agua, hecho muy importante que influye en la visión subacuática.

Visión normal

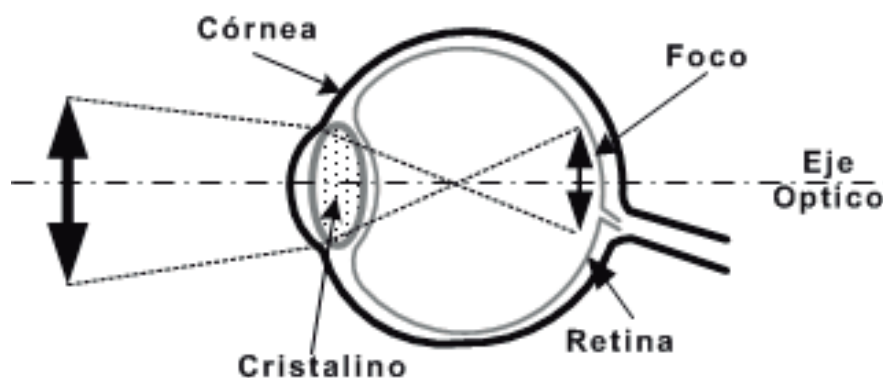


Figura 5.15: Visión Normal

Los objetos reflejan la luz emitida por las fuentes naturales o artificiales. Una vez que los rayos de luz rebotan en el objeto, inciden sobre el ojo y penetran la Pupila, por la diferencia de densidad entre el aire y los humores, se refractan y forman las imágenes en la retina, en un punto llamado Foco.

■ Visión subacuática

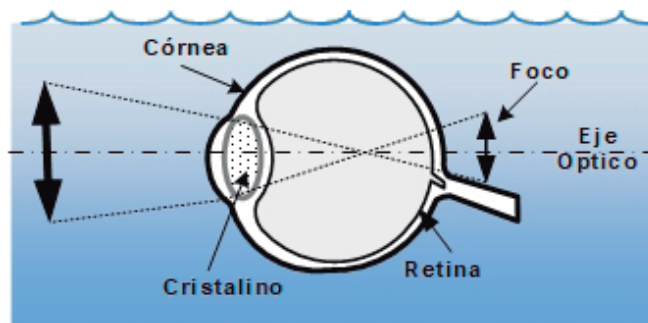


Figura 5.16: Visión bajo el agua

Bajo el agua, este perfecto mecanismo no funciona. Al observar un objeto bajo la superficie, se verán imágenes totalmente borrosas. Esto sucede porque, el agua y los humores tienen densidades similares, entonces, las imágenes no se forman en el Foco, sino en un punto detrás del mismo, comportándose el ojo como el de una persona hipermetrope, de 40 dioptrías. Para evitar esta inconveniente, se necesita crear una cámara artificial de aire entre el agua y el ojo, esto se logra con la utilización de una luneta. Su empleo, conduce a ver imágenes claras, pero no reales sino virtuales, pues al interponer un cristal entre el ojo y el agua este se comporta como una lupa, por lo tanto, las imágenes que se ven son un 30% más grande y parecen estar un 25% más cerca.

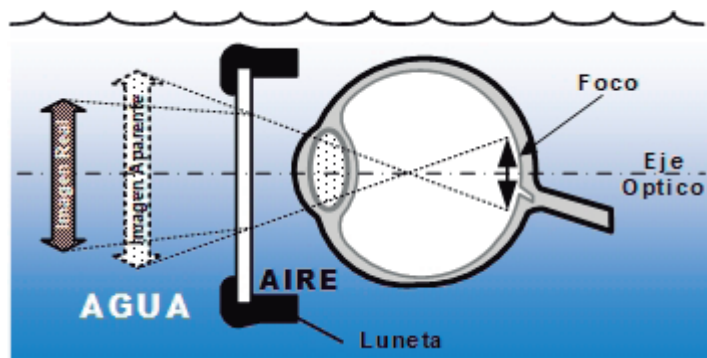
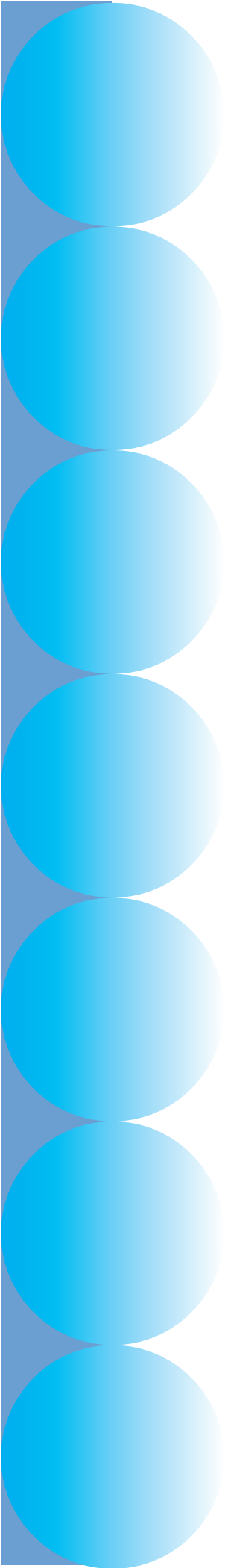


Figura 5.17: Visión con la luneta

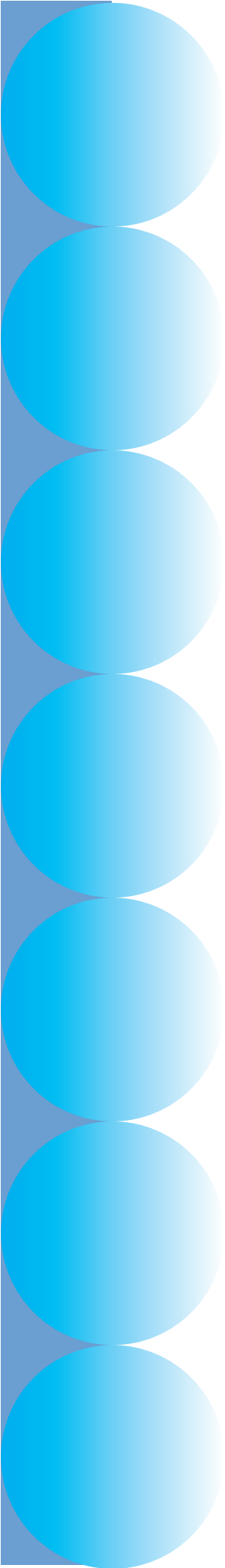
Otra consecuencia de la utilización de la luneta, es la existencia de dos zonas de visión, producidas por la refracción de la luz en el cristal. Una primera zona, llamada de Visión Plana, próxima al plano de los ojos, que representa un 30% de la superficie vidriada de la luneta y una zona de Visión Estroboscópica, que configura el resto del campo visual. Es recomendable que un buzo novato se nueva cuidadosamente hasta que se acostumbre a la visión con luneta puesto que la presencia de las dos zonas mencionadas pueden conducirlo a un accidente por diferencia de paralaje en la visión.



La gravedad

6





La gravedad



Figura 6.1: Fuerza de la Gravedad

La Ley de Gravitación, formulada por Isaac Newton dice:

“Todos los cuerpos con masa se atraen mutuamente con una fuerza directamente proporcional a sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de sus distancias”.

La fuerza de la gravedad es la responsable de la masa pesada de los cuerpos (de su peso). Todo cuerpo con masa abandonado en el espacio, se moverá en la dirección que prescribe el campo gravitatorio, y cerca de la superficie de la tierra lo harán en dirección vertical hacia el centro de la misma.

Fuerza

Cuando se empuja o tira de un cuerpo, instintivamente decimos que ejercemos una fuerza sobre el mismo. Las fuerzas pueden ser ejercidas también por objetos inanimados: resortes que se comprimen o expanden; el aire comprimido ejerce una fuerza sobre las paredes del cilindro que lo contiene. La fuerza que mejor se conoce en nuestra vida diaria es la fuerza de atracción gravitatoria, ejercida sobre todo cuerpo por la Tierra, y a la cual se la denomina Peso del cuerpo. En física Fuerza, significa toda causa capaz de modificar el estado de reposo o movimiento uniforme de un cuerpo.

Por ahora, se puede definir una unidad de fuerza, a través del siguiente experimento. Si se elige como unidad patrón de fuerza, el kilogramo patrón, que es la fuerza con que la Tierra atrae a este cuerpo, este es entonces una fuerza perfectamente definida y reproducible, que se denomina kilogramo (peso de un kilogramo).

Con objeto de poder comparar una fuerza desconocida con la fuerza unidad definida anteriormente y, por tanto, medirla, se puede recurrir a algún efecto medible producido por esta fuerza conocida y por lo tanto comparable. Uno de estos efectos medibles producidos por las fuerzas es, alterar las dimensiones o la forma de un cuerpo sobre el cual actúan; otro es alterar el estado de reposo o, de movimiento de un cuerpo. Ambos efectos se utilizan para medir las fuerzas.

El instrumento más frecuentemente utilizado para medir las fuerzas es un dinamómetro de resorte. Este instrumento consiste en un resorte cilíndrico, encerrado en una caja, fijo por uno de los extremos y que en el otro libre capaz de desplazarse lleva un fiel o índice, que se mueve sobre una escala. Una fuerza ejercida sobre el extremo libre aumenta la longitud del resorte. Por lo tanto, el instrumento puede calibrarse la siguiente manera: se suspende primero en el extremo libre del dinamómetro de resorte el kilogramo patrón, y se marca la posición del fiel con la señal 1 Kg. Después, se suspenden simultáneamente de la balanza dos, tres o más cargas, la fuerza que alarga el resorte es de 2 Kg, 3 Kg, etc., y las posiciones correspondientes del fiel se señalan con las indicaciones 2 Kg, 3 Kg, etc. Luego al comparar la magnitud de una fuerza desconocida, medida con el dinamómetro de resorte se podrá obtener la magnitud de la misma con referencia a una escala predeterminada y conocida.



Este procedimiento no presupone nada acerca de las propiedades elásticas del resorte, excepto que la fuerza ejercida sobre él es siempre la misma cuando su extremo libre se detiene en el mismo punto. EL *DINAMÓMETRO DE RESORTE* así calibrado puede utilizarse entonces para medir cualquier fuerza desconocida.

Representación gráfica de las fuerzas. Vectores

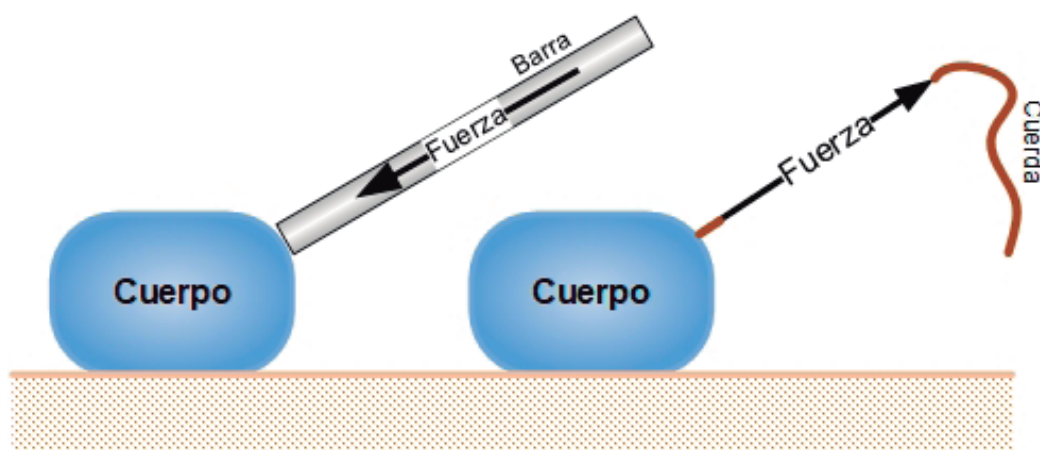


Figura 6.2.: Fuerzas actuando sobre un cuerpo

Para poder trabajar y hacer cálculos con las fuerzas, es necesario representarlas de algún modo. Para esto, los físicos y los matemáticos, han creado un sistema de representación gráfica de los efectos que producen las fuerzas.

Supongamos que se va a hacer deslizar sobre plano horizontal un objeto. Primero se hará arrastrando el mismo en con empujándolo con una barra rígida y, luego con una cuerda, como se muestra en la Figura 6.1; es decir que se va a deslizar el objeto ejerciendo una fuerza sobre él utilizando dos métodos distintos.

El movimiento del objeto no es producido por el cabo que tira o, la barra rígida que empuja, sino por la Fuerza $[F]$, que la cuerda o la barra ejerce sobre el mismo, lo que si varía es la dirección en la cual actúa la fuerza según el método utilizado, es decir, en el caso de la barra el sentido de la Fuerza es hacia abajo y para la cuerda es en el sentido contrario.

Supongamos que el valor de las fuerzas aplicadas es de 10 Kg. Es claro que escribir simplemente "10 Kg" sobre el esquema no define completamente la fuerza, puesto que no indicará la dirección en la cual está actuando. Se puede describir una fuerza relatando cada una de sus características, para el sistema propuesto en la Figura 6.1 tendremos que decir: "10 Kg, 30° por encima de la horizontal, hacia la derecha". Todas las aclaraciones anteriores pueden darse más brevemente si, se adoptara una convención y se representa una fuerza por una flecha. Entonces, la longitud de la flecha, (a una escala elegida), indica el valor de la fuerza (10 kg), la dirección en que apunta la flecha muestra el sentido de la fuerza, la línea sobre la cual se asienta esta, muestra la recta de acción de la misma y, el punto sobre el cual actúa la fuerza, se denomina punto de aplicación. La Figura: 6.3 muestra el diagrama de las fuerzas correspondientes a la Figura: 6.2.

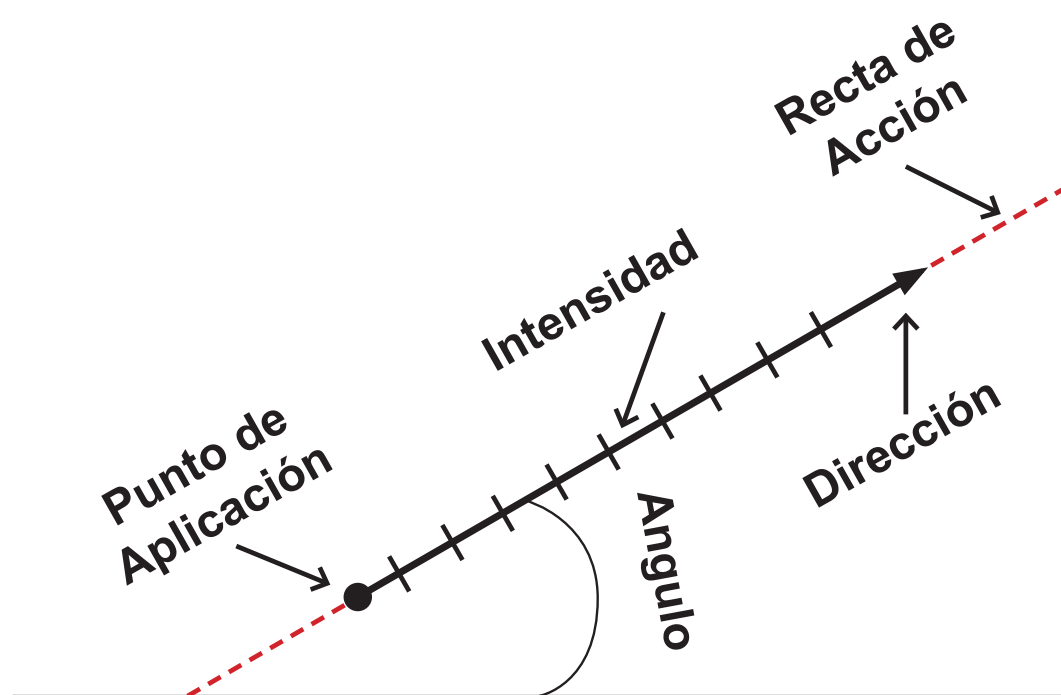


Figura 6.3.: Representación gráfica de una fuerza

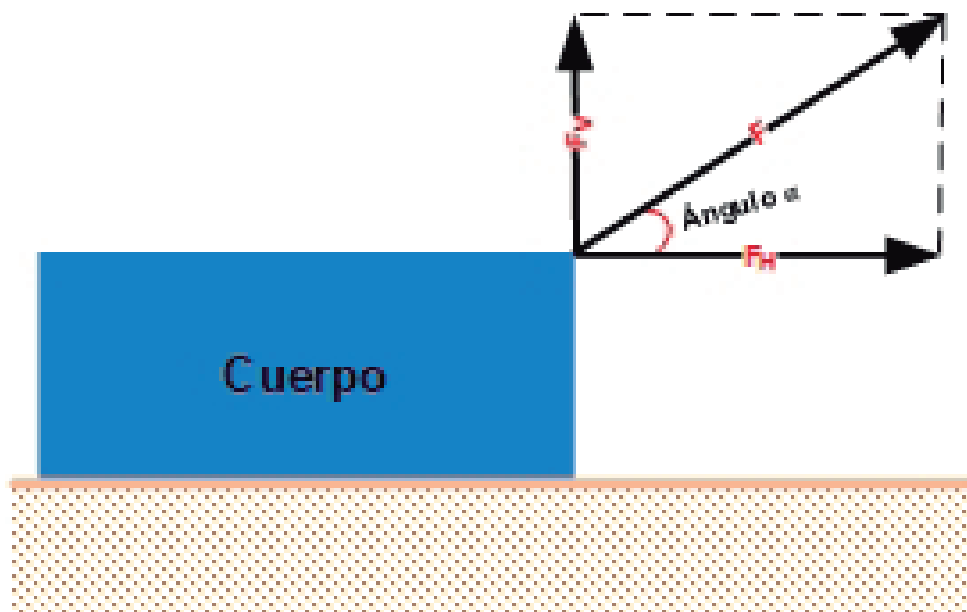


Figura 6.4.: Descomposición de una fuerza

Pero esto, no es insuficiente si se piensa en los efectos que puede producir dicha Fuerza [F], la Figura 6.4, muestra como se puede descomponer nuestra fuerza, en una Fuerza Vertical [FV] y en otra Fuerza Horizontal [FH]. Donde el valor de cada una de las fuerzas será:

$$F_H = F \times \cos \alpha$$

y

$$F_V = F \times \sin \alpha$$

La fuerza no es la única magnitud física que requiere especificar la dirección, además del valor de la magnitud misma; por ejemplo, la velocidad de un automóvil no está completamente determinada indicando que es de 100 Km/h; se necesita conocer también la dirección. Por el contrario, otros conceptos, como el volumen, las distancias o el tiempo, no tiene ninguna dirección asociada a los mismos.

Las magnitudes que, como la fuerza y la velocidad, llevan consigo las cualidades, valor y dirección, reciben el nombre de magnitudes vectoriales y, con estas se realizan operaciones matemáticas como su suma o resta, como ya se verá muchas veces a lo largo del presente trabajo. Otras que, como el volumen, quedan determinadas únicamente por su valor se denominan magnitudes escalares.

Una aplicación práctica del concepto de Fuerza lo encontramos en el diseño y análisis de las aletas:

Pequeña historia de las aletas de buceo

Aunque se conocían las aletas de buceo desde principios de la edad moderna, cuando Leonardo da Vinci realiza los primeros dibujos explicados en su Códice Atlántico.

Tal y como se las conocemos hoy; las aletas de buceo fueron desarrolladas en 1914 por el Capitán de Corbeta de la Marina Nacional de Francia, Louis Marie de Corlieu, inspirado en la cola de los peces y lobos marinos, quien las patentó con el nombre de, "Paletas de Propulsión".

En 1939, tras años de dificultades, Louis de Corlieu pudo iniciar la producción en serie de sus "Paletas de Propulsión". En ese mismo año, el estadounidense Owen P. Churchill le compró una licencia a de Corlieu para fabricar sus aletas en Estados Unidos. Este, comenzó a comercializarlas bajo el nombre de "SWIMFINS" y las propuso a la Armada de los Estados Unidos, quien las adquirió desde 1940 y luego fueron usadas y siguen siendo utilizadas en innumerables operaciones de guerra.



Figura 6.5: Louis Marie de Corlieu

Dinámica del movimiento de las aletas

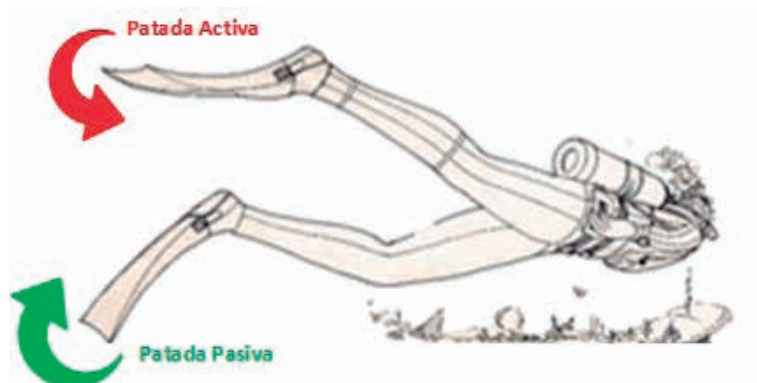


Figura 6.6: Locomoción

La función de las aletas de buceo es, aprovechar la fuerza de las piernas para proveer mayor empuje porque, los pies humanos brindan relativamente poco, cuando el buzo está totalmente equipado.

Al desplazarse bajo la superficie el buzo, realiza una patada similar a la del estilo "Crawl" de nación. Manteniendo las rodillas extendidas, el movimiento nace en la cadera manteniendo las piernas rectas y el pie lo más lineal posible con el eje de estas.

Como resultado del movimiento descrito, el ciclo de la patada es: mientras una pierna baja, la pala de la aleta hace fuerza con la cara superior de la misma, mientras que la otra aleta, mientras sube, produce el empuje con la cara inferior de la pala. Natural y normalmente, ambas piernas se estarán moviendo simultáneamente, produciendo una acción tipo tijera.

Al ciclo descendente del movimiento se lo llama "Patada Activa", mientras que al ciclo ascendente, se lo llama "Patada Pasiva".

Análisis de las aletas de buceo

El análisis del movimiento las aletas, se basa en la aplicación de la "Tercera Ley del Movimiento" de Newton, también conocida como: "Principio de Acción y Reacción", el cual dice:

"Si un cuerpo A ejerce una acción sobre otro cuerpo B, éste realiza sobre A otra acción igual y de sentido contrario".



Figura 6.7: Aleta Rondine

Puesto esto en la óptica del buceo, el Empuje [E] producido por las aletas en su movimiento en forma de tijera, tiene como consecuencia una Reacción [R], de igual intensidad y de sentido contrario, resultando de esta acción y reacción un desplazamiento más eficiente del buzo.

Si bien la metodología de análisis es igual, al existir un gran número de marcas, tipos y modelos de aletas de buceo, indiscutiblemente los resultados serán diferentes para cada una de ellas. Por esto y como este desarrollo solo tiene como propósito dar un ejemplo práctico de la aplicación del concepto de Fuerza, en el contexto del buceo, se ha optado por realizarlo utilizando una aleta muy conocida y con larga historia, pues llega hasta la actualidad desde los inicios de la práctica del buceo deportivo como es la aleta “Rondine” de Cressi.

La aleta Rondine, posee un diseño de pala hidrodinámico y su calza es de talón cerrado. Además, tiene flotabilidad positiva, es decir no se hunde en agua salada ni, en agua dulce.

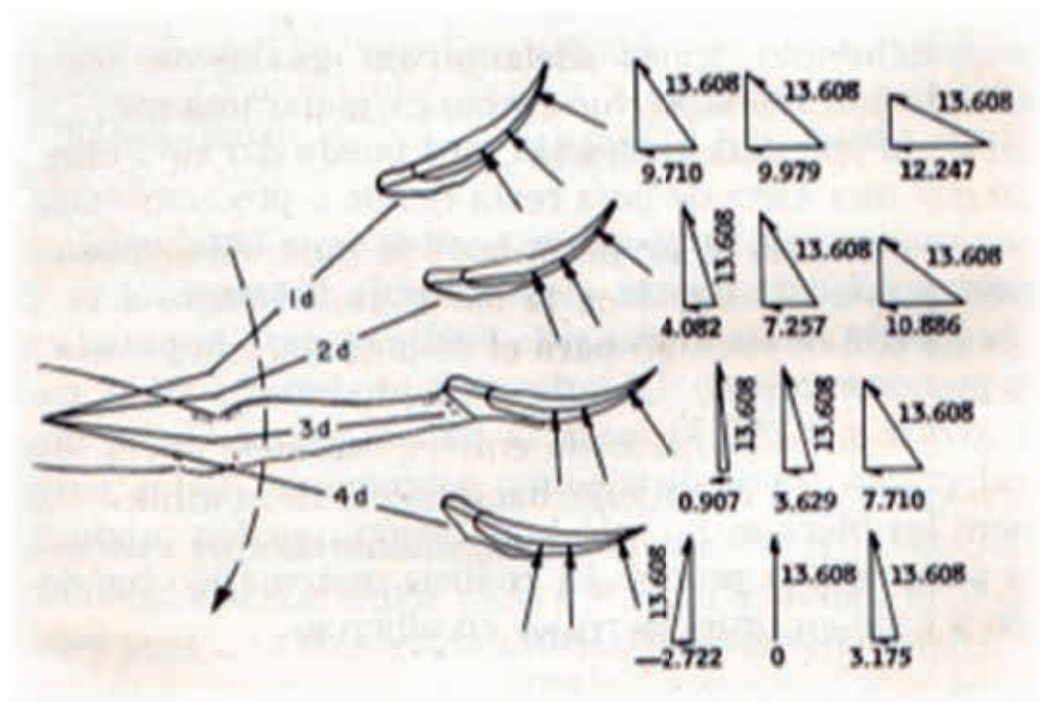


Figura 6.8: Ciclo Descendente – Patada Activa

Para el desarrollo del ejercicio, vamos a suponer que cada pierna en sus ciclos de movimiento ejerce una Fuerza [F], llamada Empuje [E] de 13,608 kg. Entonces, aplicando la Tercera Ley del Movimiento” de Newton, o “Principio de Acción y Reacción”, cada aleta recibirá por parte del agua que rodea al buzo una fuera igual y contraria que se llama Reacción [R], cuyo valor será también de 13,608 Kg.

Ahora bien, como se puede apreciar en la Figura 6.8: Ciclo Descendente – Patada Activa, se aprecia la descomposición de fuerzas, en todo instante de los ciclos del movimiento existe una fuerza de Reacción [R], que actúa en forma perpendicular a la pala de la aleta.

Para el análisis, vamos a tomar tres puntos significativos de la aplicación de la fuerza de Reacción [R], como son la punta de la aleta, el centro de la pala y la calza de la misma y en estos analizaremos la componente horizontal de la fuerza de Reacción [RH] por ser la componente que produce la propulsión

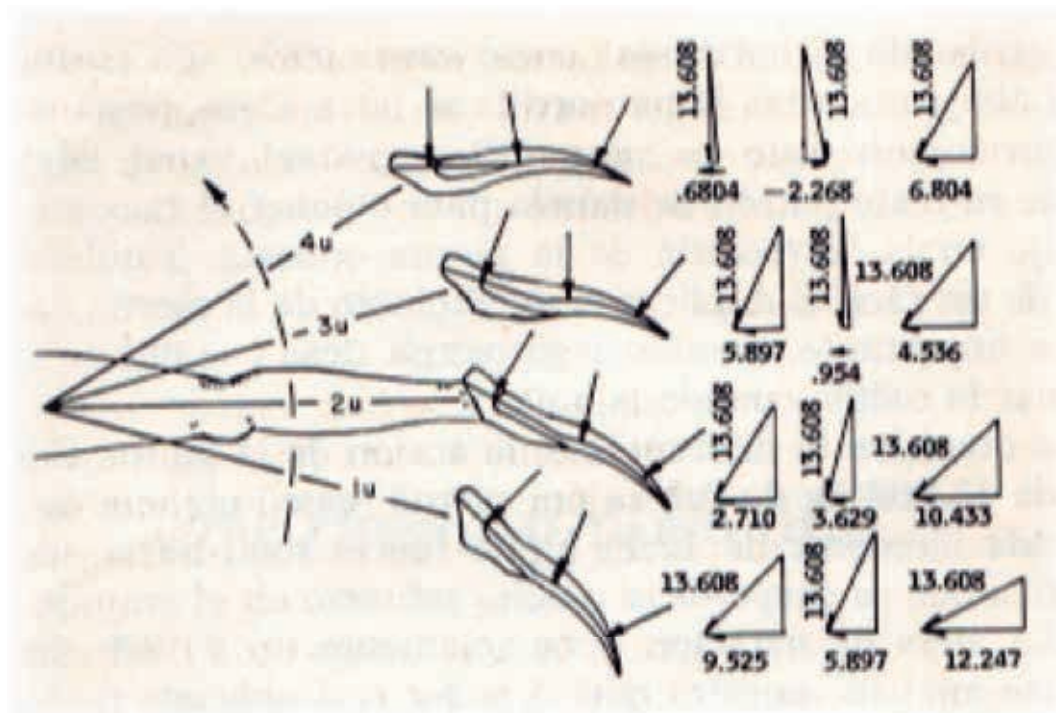


Figura 6.9: Ciclo Ascendente – Patada Pasiva

Como sabemos, toda Fuerza [F] puede ser descompuesta en las fuerzas FP y FH que la componen, siendo una perpendicular y la otra horizontal a esta.

La Figura 6.9: Ciclo Ascendente – Patada Pasiva, muestra la descomposición vectorial de la fuerza de Reacción Horizontal [RH] en cuatro momentos significativos de los ciclos del movimiento, en el comienzo, cuando la pierna está alineada con el eje del cuerpo, en el punto medio del movimiento y al final del mismo.

Analizando la mencionada figura, se puede observar como la fuerza de Reacción Horizontal [RH], varía su valor a cada instante, llegando este a valores máximos de 12,247 Kg en la punta de la aleta a valores cero o negativos.

Si se componen las fuerzas de Reacción Horizontal [RH] se tendrá:

POSICIÓN AL INICIO DEL CICLO	Ciclo Descendente (Patada Activa)				Ciclo Ascendente (Patada Pasiva)			
	1d	2d	3d	4d	1u	2u	3u	4u
Fuerza de Reacción [R] (Kg)	13,608	13,608	13,608	13,608	13,608	13,608	13,608	13,608
Reacción Horizontal [R _H] (Kg)	9,979	8,301	4,082	0,149	9,085	7,257	4,990	1,723
Reacción Horizontal por Ciclo [R _C] (Kg)	5,628				5,792			
Reacción Horizontal Total [R _{T_H}]	(Ciclo Descendente + Ciclo Ascendente)						12,111	

Tabla 6.a: Análisis de las aletas

■ Conclusiones

- En la aleta de pala hidrodinámica compensada, las fuerzas de Reacción Horizontal [RH] descendentes y ascendentes son prácticamente iguales.
- Reacción Horizontal Total [RTH] medida en kilogramos fuerza (Kg) es levemente inferior a Fuerza de Reacción [R] aplicada inicialmente.
- Al ser la Reacción Horizontal Promedio [RPH] medida en kilogramos fuerza (Kg), similares en ambos ciclos, reduce la probabilidad de producir calambres durante la inmersión.

■ Trabajo de una fuerza

“Una fuerza constante genera trabajo cuando, aplicada a un cuerpo, lo desplaza a lo largo de una determinada distancia.”

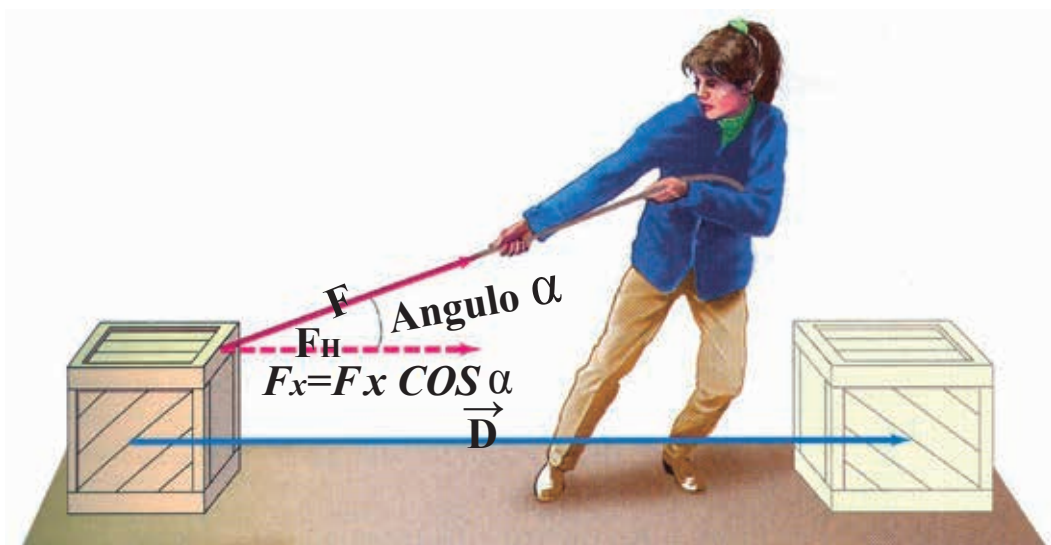


Figura 6.10: Trabajo [W] de una Fuerza [F]

Mientras se realiza trabajo sobre el cuerpo, se produce una transferencia de energía al mismo, por lo que puede decirse que el trabajo es energía en movimiento. Por otra parte, si una fuerza constante no produce movimiento, no se realiza trabajo. Por ejemplo, el sostener un libro con el brazo extendido no implica trabajo alguno sobre el libro, independientemente del esfuerzo necesario.

El trabajo se expresa en el Sistema de Unidades MKS (Metro/Kilogramo/Segundo) en Joules (J).

Se realiza trabajo, cuando la fuerza tiene la dirección del movimiento y se expresa:

$$W = F x D$$

Donde:

W: trabajo realizado por la fuerza [J] y

D: la distancia en metros [m], en la cual se aplicó la fuerza

Hemos dicho, que para que una fuerza produzca Trabajo [W], dicha fuerza o una componente de la misma, debe tener la dirección del movimiento o, dicho de otro modo, la fuerza que nos interesa es la Fuerza Horizontal [FH], mientras que la Fuerza Perpendicular [FP] al movimiento no realizan trabajo. Entonces, como se explicó anteriormente, el Trabajo [W] realizado por la componente Horizontal [FH] será:

$$W = D \times F_H \times \cos \alpha \quad (1)$$

Entonces:

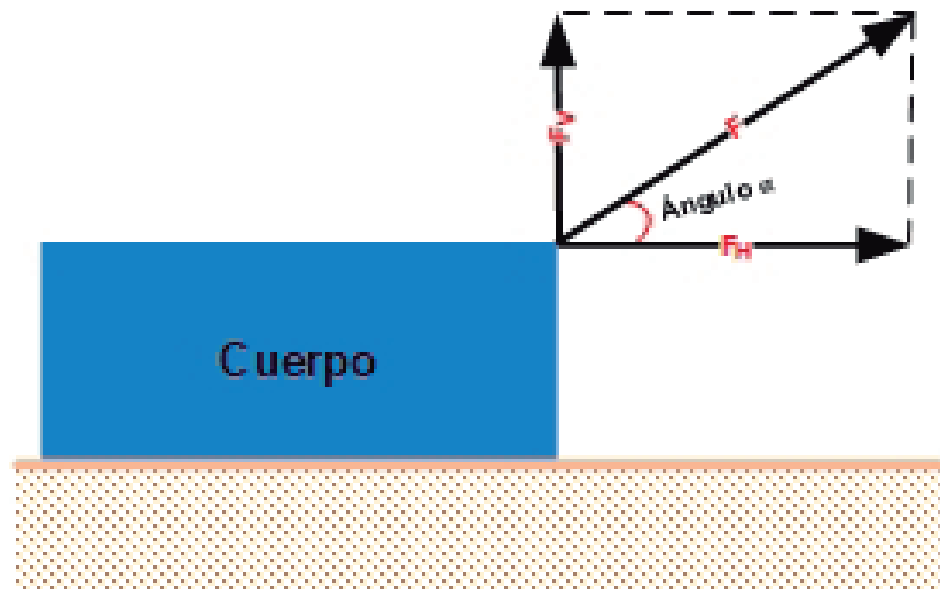


Figura 6.11.: Trabajo de la F_H y F_V

Como $\cos \alpha = 1$

Reemplazando en (1):

$$W = F \times D$$

Es decir que el Trabajo [W], es igual a Fuerza [F_H] x Distancia [D], si la Fuerza [F_H] es paralela al plano de movimiento.

Mientras que cuando $\sin \alpha = 0$, el producto Fuerza [F] x Distancia [D] es 0; decir que la Fuerza [F_V] no produce Trabajo [W].

La fuerza puede no ser mecánica, como ocurre en el levantamiento de un cuerpo o en la aceleración de un avión de reacción; también puede ser una fuerza electrostática, electrodinámica o de tensión superficial.

El concepto de Trabajo de una Fuerza, se aplica en el Análisis del desempeño y calidad de los reguladores de demanda.

■ Análisis de un reguladores de demanda

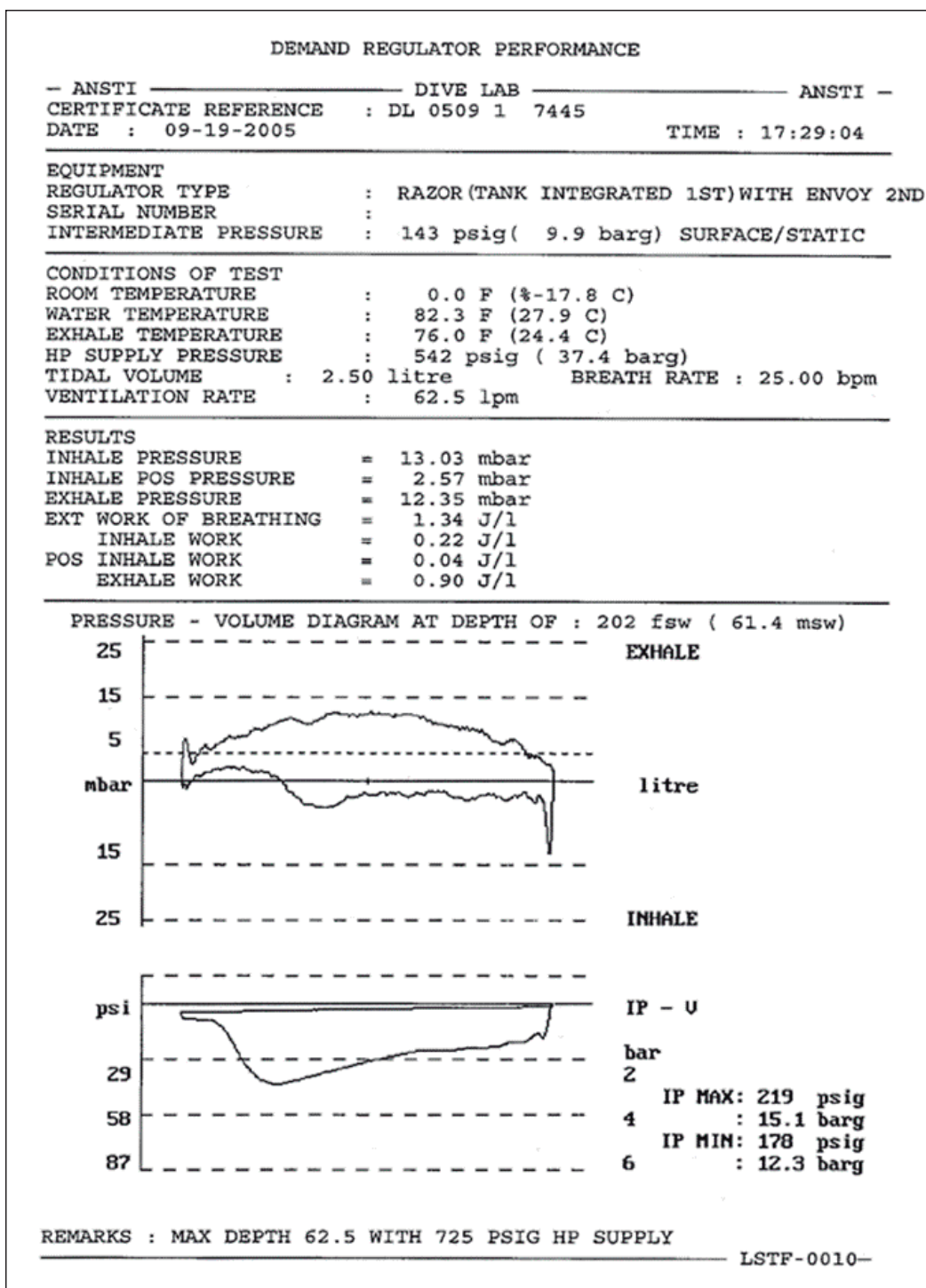


FIGURA 6.12: Testeo de un Regulador de Demanda

La resistencia que opone el Regulador al proceso respiratorio (inhalar y exhalar) se llama Trabajo o Esfuerzo Respiratorio (conocida por su sigla en inglés como Work of Breathing - WOB) e indica cuán “fácil” es respirar a través de este. Como todo Trabajo Mecánico en el sistema de Unidades MKS (Metro/Kilogramo/Segundo), se mide en Joules.

Como se ha explicado en el párrafo anterior. El Joule, es la unidad de trabajo en el sistema de unidades MKS (Metro/Kilogramo/Segundo) y, es igual al trabajo realizado por una fuerza de un Newton que actúa a través de una distancia de un metro. Por lo tanto, 1 Joule es la energía utilizada en empujar un peso de 1 kg (9,80665 newtons) la distancia de 1 metro.

Por lo tanto, cuanto menor sea el Trabajo o Esfuerzo Respiratorio (Work of Breathing - WOB) de mayor calidad será el regulador, porque menor resistencia opondrá al proceso de la respiración (inhalar y exhalar), es algo así como estar en la tierra y no tener resistencia a la inhalación y la exhalación.

Ahora bien, sabemos que cuanto más profunda es la inmersión y, más frío se halle el medio ambiente, el aire entregado por el regulador será más denso, por lo cual se requerirá más esfuerzo para respirar (inhalar / exhalar). Entonces que el regulador tenga un WOB bajo es importante.

El ensayo general de reguladores se realiza de la siguiente manera:

Pautas:

- a. Presión de Trabajo: 1.500 PSI (100 bar)
- b. Frecuencia Respiratoria: 25 respiraciones por minuto
- c. Volumen respiratorio: 2,5 litros por cada respiración.
- d. Trabajo o Esfuerzo Respiratorio (Work of Breathing - WOB) se expresa en joules/ litro.

Desarrollo:

1. Trabajo Respiratorio a 30 m (99 pies). Un primer ensayo estándar de la Marina de los EE.UU. hace funcionar el regulador a esta profundidad para establecer una línea de base para comparar el rendimiento.
2. Trabajo Respiratorio a 60 m (198 pies). Esta es la prueba estándar de la Marina de los EE.UU., con una presión de 1.500 psi, una frecuencia respiratoria de 25 respiraciones por minuto y el volumen respiratorio de 2,5 litros por cada respiración. Esta medición se expresa en joules por litro.

Las normas de la US Navy de Clase A son:

- Frecuencia respiratoria: 62,5 litros/minuto
- Volumen corriente: 2,5 litros (volumen pulmonar)
- Profundidad de Trabajo: 60 m (198 fsw).

El estándar Marina de los EE.UU. para Reguladores "Clase A" es que con estas condiciones el Trabajo o Esfuerzo Respiratorio (Work of Breathing - WOB) no supere los 1,4 joules/litro.

Densidad

Se define como Densidad [δ] a la relación entre la masa de una sustancia y su volumen

$$\delta = \frac{m}{v}$$

Las unidades de densidad utilizadas normalmente son:

$$[\delta] = \text{kg/dm}^3; \text{gr/cm}^3; \text{lb/pt}^3$$

Como en tantas cosas de la física, es necesario tomar un elemento de referencia para poder tomarla como un valor de referencia para las demás. En el caso de la densidad, el elemento de referencia es el agua pura a la cual se le adjudicó el valor de 1,00 gr/cm³. La siguiente tabla muestra las densidades de las sustancias más comunes:

ELEMENTO	DENSIDAD [δ]
	gr/cm ³
Corcho	0.88
Hielo	0.92
Madera	0.94
AGUA	1.00
Aluminio	2.70
Acero	7.80
Plomo	11.30

Tabla 6.b: Densidades de diferentes materiales

Densidad del agua, salinidad, compresibilidad

La densidad del agua destilada, agua totalmente pura, libre de sales y minerales, obtenida en laboratorio por el proceso de destilación, se toma como referencia con un valor de:

$$\delta_{\text{AGUADESTILADA}} = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 1 \text{kg} / \text{l} = 1.000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

La densidad promedio del agua dulce va desde aproximadamente 1.004 a 1.014 kg / m³, con una salinidad de 1 al 14 ‰, conociéndose las aguas de baja salinidad como “blandas” y las de alta como “duras”, que son las que cortan el jabón al lavar.

COMPONENTE	g / kg H ₂ O	%
Bromo [Br]	0,065	0,19
Calcio [Ca]	0,400	1,16
Cloro [Cl]	18,980	55,04
Flúor [F]	0,001	0,00
H ₂ BO ₃	0,026	0,07
H ₂ CO ₃	0,140	0,41
Potasio [K]	0,380	0,04
Magnesio [Mg]	1,272	3,69
Sodio [Na]	10,556	30,61
Peróxido de Azufre [SO ₄]	2,649	7,68
Sr	0,013	0,04
Total	34,482	100,00

Tabla 6.c: Tabla de composición de agua oceánica según varios autores, basada en estudios realizados por los investigadores SVERDRUP, JOHNSON y FLEMING en 1 942

Mientras que las aguas saladas, oceánicas o, de mar tienen una densidad que varía de 1.015 a 1.045 kg/m³, (promedio 1,033 a 1,035 kg/m³), es decir que tiene una salinidad del 15 al 45 ‰. Por otra parte, como ya se ha dicho la densidad del aire atmosférico a nivel del mar varía entre 1,136 y 1,290 kg/m³. Es decir que proporcionalmente, la densidad del agua con respecto al aire es de 778 a 892 (en caso del agua dulce) mayor que la del aire e, inversamente la de este es de 0,00128 a 0,00112 de la densidad del agua dulce. En el caso del agua salada, oceánica o, de mar su densidad es aproximadamente 893 a 920 veces mayor que la del aire e inversamente, la del aire es entre 0,00112 y 0,00109 respecto de la del agua de mar.

El agua se comporta como prácticamente incompresible a las presiones comunes del Buceo con aire y recién se comienzan a sentir algunos efectos en los límites del uso de mezclas gaseosas; la realidad es que de no ser compresible el agua, los océanos tendrían una altura de unos 30 / 35 metros mayor a la actual.

El agua, actuando como incompresible ejerce directamente su Masa sobre una superficie dada, como la Masa depende del Volumen basta tomar un área de $1,00 \text{ cm}^2$ y considerar la Masa de la columna de agua que apoya sobre este, lo cual dará un resultado en gramos [g] o sus derivados. Para conocer la Fuerza ejercida habrá que pasar de gramos o kg a, N (Newton) o derivados; finalmente para saber que presión se ejerce sobre el lugar, habrá que dividir la Fuerza por la superficie o área de apoyo y según el Sistema Internacional será un resultado en $\text{N} / \text{cm}^2 = \text{Pa}$ (Pascal, sus múltiplos o submúltiplos); empleamos el hectó kilo Pascal (hkPa) para comparar con kg / cm^2 y atmósfera, que han sido los más utilizados por los que actuamos bajo el Sistema Métrico Decimal.

Esta es aproximadamente la composición del agua oceánica para una salinidad de cerca del 35 ‰, que es casi dominante en el océano abierto por todos ellos, mientras que en cercanías de las costas varía en relación con las materias que se intercambian entre estas y el y el agua y con los regímenes climáticos.

Peso del aire

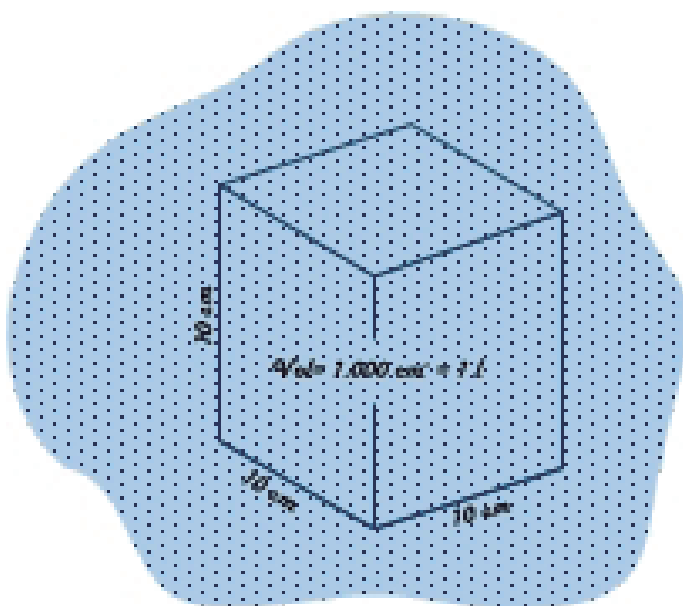


Figura 6.13: *Peso de una masa de aire*

Imaginemos que por un instante se aísla en el centro de una masa de aire sometida a Presión Atmosférica [PAt], un cubo de 10 cm de lado. Se tendrá entonces un volumen de 1.000 cm^3 , es decir 1 litro de aire. De esta masa de aire se conoce:

1. Su volumen ($1.000 \text{ cm}^3 = 1 \text{ l}$).
2. La proporción de cada uno de los gases que la componen.
3. La Masa molecular de cada uno de los gases que la componen.
4. Se sabe que un mol de cualquier gas ocupa 22,4 litros.

Por lo tanto, con todos estos datos, será fácil calcular la Densidad [δ] y, luego su Peso.

Primero calcularemos las Densidades [δ] del Oxígeno [O_2] y del Nitrógeno [N_2]:

$$\delta = \frac{m}{v} \quad (1)$$

De la Tabla Periódica de los Elementos se obtiene la Masa Atómica de cada uno de los gases:

ELEMENTOS	Masa Atómica
Oxígeno [O_2]	31,996 g/mol
Nitrógeno [N_2]	28,014 g/mol
Tabla 6.d: Masa Atómica	

$$\delta O_2 = \frac{31,996 \frac{g}{mol} \times 1 mol}{22,4 l} = 1,428 \frac{g}{l}$$

$$\delta N_2 = \frac{28,014 \frac{g}{mol} \times 1 mol}{22,4 l} = 1,251 \frac{g}{l}$$

De (1):

$$m = \delta \times V \quad (2)$$

Por lo tanto, con (2), el peso de cada componente del aire será igual a su masa por el porcentaje en el mismo (Nitrógeno [N_2]= 79%; Oxígeno [O_2]= 21%):

$$m O_2 = 0,21 \times 1,428 \frac{g}{l} \times 1 l = 0,2998 g$$

$$m N_2 = 0,79 \times 1,251 \frac{g}{l} \times 1 l = 0,9882 g$$

$$m \text{ AIRE} = m O_2 + m N_2 = 0,2998 g + 0,9882 g = 1,288 g \neq 1,3 g$$

Dato este que no es de menor importancia en el mundo del buceo pues, permite calcular la compensación del peso del lastre al finalizar las inmersiones y hacer más fáciles las paradas de descompresión. Este dato, tiene mucha aplicación en las técnicas y habilidades para el uso de trajes secos, en las inmersiones de gran profundidad donde se utilizan más de uno o dos botellones y en el buceo espeleológico por igual motivo que en la anterior especialidad.

Calculemos la diferencia de peso para dos botellones populares en el mercado. Ambos serán de 80 ft³, es decir de 11 l. de capacidad, pero uno con una Presión de Trabajo [Ptr] de 200 bar (CASO 1) y el otro de 300 bar (CASO 2), se asumirá para ambos casos que se reserva al final de la inmersión una cantidad de aire de seguridad, equivalente a 50 bar, con estos datos el peso del aire consumido durante la inmersión y por lo tanto la compensación del peso de los lastres al finalizar la misma será:

CASO 1

	Capacidad	Presión Trabajo	Peso aire	
	- litros -	- bar -	- g/l -	- g -
Peso del aire al inicio del buceo	11	200 bar	1,3 g/l	2.860 g
Peso de la reserva de aire de seguridad		50 bar		715 g
Peso del aire consumido				2.145 g = 2 kg

CASO 2

	Capacidad	Presión Trabajo	Peso aire	
	- litros -	- bar -	- g/l -	- g -
Peso del aire al inicio del buceo	11	300 bar	1,3 g/l	4.290 g
Peso de la reserva de aire de seguridad		50 bar		715 g
Peso del aire consumido				3.575 g = 3,5 kg

Como se puede apreciar comparando ambos casos, el peso de lastre a compensar es importante. Si se piensa en términos de Buceo Técnico (Inmersiones en Cuevas, Naufragios, Profundo, etc) donde se podría llegar a utilizar, 3, 4, o más botellones el peso a compensar se incrementa considerablemente.

Demás está decir que, en la práctica, este cálculo se realiza antes de cada inmersión, midiendo la presión real de cada cilindro después de un tiempo prudencial de cargado, cuando este ya ha adquirido la temperatura ambiente.

Concepto de presión



Figura 6.14: Concepto de Presión

Se define como presión a:

“La relación entre una Fuerza [F] y una Superficie [S]”

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

Cabe preguntarse entre ¿que Fuerza [F] y que Superficie [S]? En cuanto la fuerza diremos que puede ser cualquiera, mientras que la superficie debe ser aquella sobre la cual se halla aplicada la fuerza.

Así vemos que un hombre que camina por la nieve se hunde en esta por acción de su Peso, mientras que otro montado en un vehículo para nieve no. Esto sucede porque la relación ente el peso y la superficie de los pies del hombre que camina, mayor que la relación entre el peso y la superficie de apoyo del vehículo para nieve.

Presión atmosférica

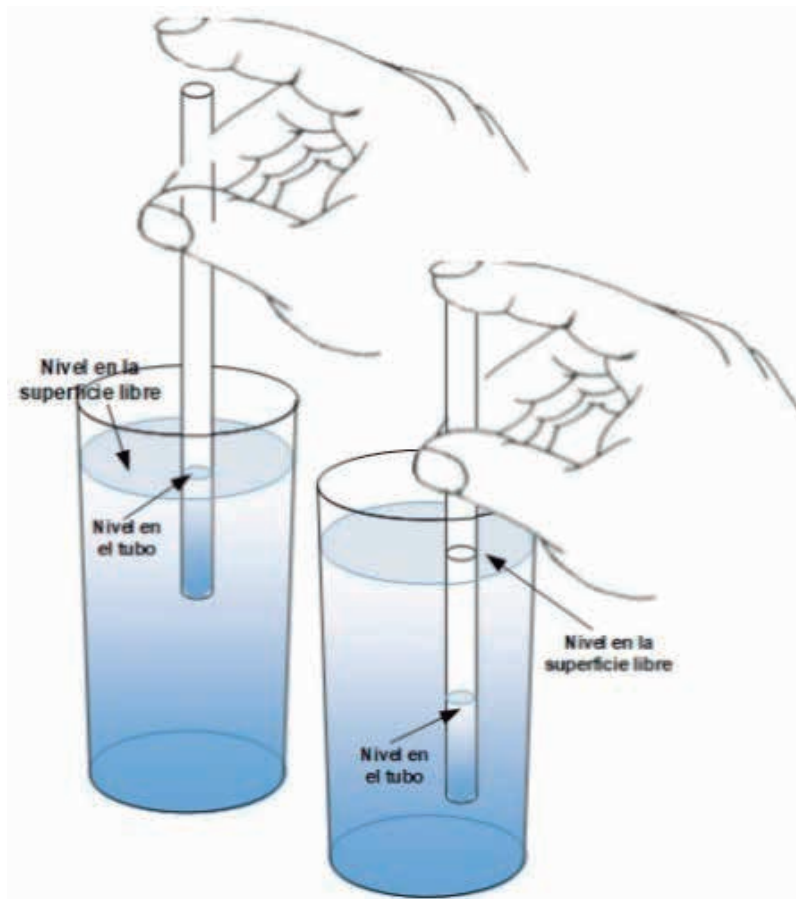


Figura 6.15: Existencia del aire

Nuestro Planeta se halla envuelto por una capa de aire, llamada Atmósfera.

El aire está formado por algunas sustancias que no son percibidas por los sentidos. Además, desde que nacemos nuestro cuerpo soporta el peso de esta capa de aire por lo cual, estamos acostumbrados a esta y no notamos su presencia constante

La existencia del aire, puede ser demostrada con el sencillo experimento que muestra la figura. Si se toma un recipiente con agua e, introducimos en el un tubo con el extremo libre destapado se verá que el nivel del líquido dentro y fuera del tubo alcanza una misma altura. Si ahora se tapa con el dedo el extremo libre del tubo y se sumerge este en el agua, se verá que el nivel del agua dentro del tubo es diferente al nivel de la misma a la altura de la superficie libre, lo cual demuestra la existencia de alguna sustancia que ocupa el volumen dentro del tubo. Y dicha sustancia es el aire.

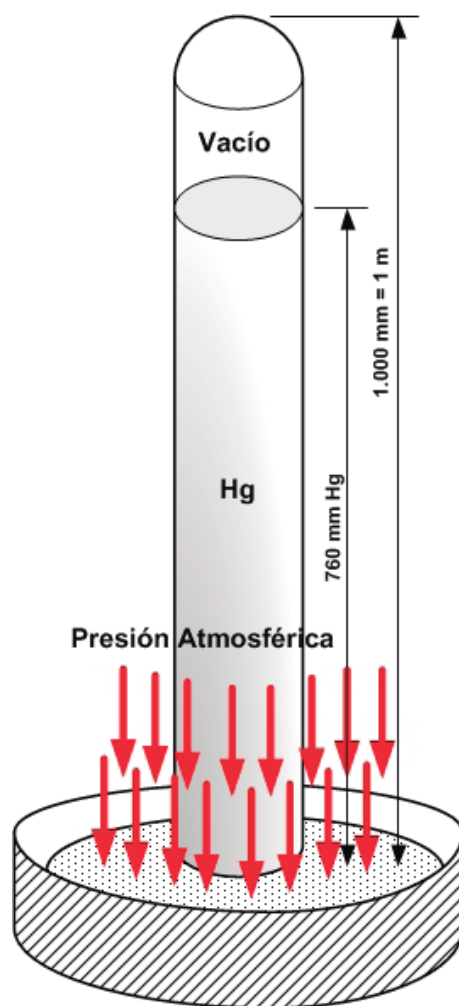


Figura 6.16: Experimento de Torricelli

En el Siglo XVII, la ciencia dio un paso importante cuando se demostró que la capa de aire que rodea la tierra, ejerce una presión sobre su superficie.

De todas las relaciones de Fuerzas [F] y Superficies [S] imaginables, hay una que nos interesa en forma especial. La relación entre el Peso [P] de la masa de aire que rodea la Tierra y la Superficies [S] de esta se llama Presión Atmosférica [PA_t].

Fue medida por primera vez por el científico italiano Evangelista Torricelli, (1608 – 1647), eminente físico y matemático italiano secretario de Galileo Galilei. Llevó a cabo experimentos barométricos que le permitieron demostrar la existencia del vacío e inventar el barómetro y, la teoría de que los vientos son causados por la diferencia de temperatura entre distintas masas de aire.

Su experimento consistió en invertir en una cubeta un tubo de 1 metro de alto, cerrado por uno de sus extremos que contenía Mercurio (Hg). Observó entonces que la columna descendió hasta quedar equilibrada en los 760 mm, medidos desde la superficie libre del metal, hasta el enrasc.

Entonces se tomó como primera unidad de la presión Atmosférica a:

$$760 \text{ mmHg} = 1 \text{ at}$$

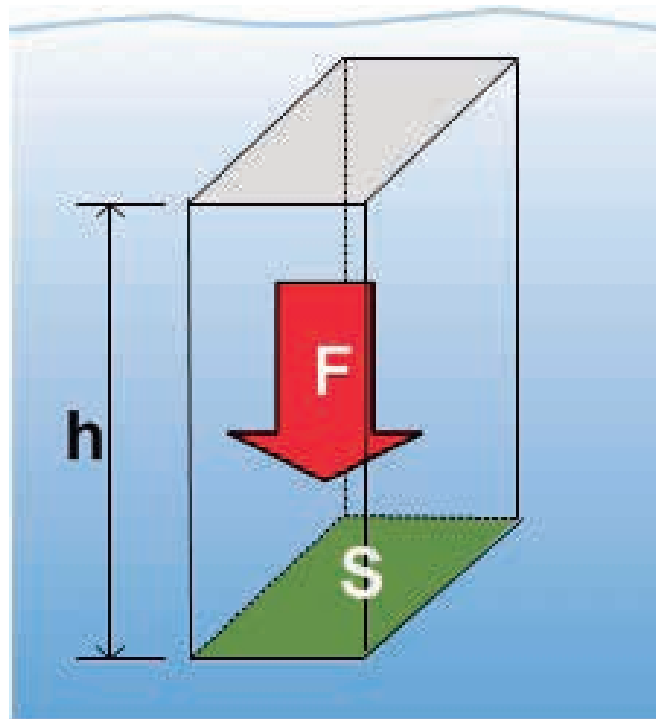


Figura 6.17: Presión Hidrostática

Supongamos ahora que en el centro de un espejo de agua es posible aislar una columna líquida que tiene cierta Altura [h], y cuya base posee una Superficie [S]. Y nos preguntamos, ¿qué Presión [P] ejerce nuestra columna sobre su base?

Aplicando la definición de presión, se tendrá.

$$P = \frac{F}{S} \quad (1)$$

Pero la Fuerza [F] que ejerce la columna de agua es igual a su Peso, el cual es igual a la Densidad [δ] por el Volumen [V], por lo tanto, reemplazando en (1), se tiene:

$$P = \frac{F[\text{gr}]}{S[\text{cm}^2]} = \frac{\delta \times V}{S} \quad (2)$$

Pero el Volumen [V], es igual a la Superficie de la Base [S], por la Altura [h] de la columna de agua, reemplazando ahora en (2), se llega a:

$$P = \frac{F[\text{gr}]}{S[\text{cm}^2]} = \frac{\delta \times V}{S} = \frac{\delta \times S \times h}{S} = \delta \times h$$

de esta última ecuación se deduce que la Presión [P], que ejerce una columna líquida depende exclusivamente de su Densidad [δ] y de su Altura [h]. La Densidad [δ] del agua salada es $1,026 \text{ gr/cm}^3$, y admitiendo que la columna imaginaria es de 10 metros (10.000 cm) de altura, se tendrá:

$$P = \delta \times h = 1,026 \text{ gr/cm}^3 \times 10.000 \text{ cm} = 10.260 \text{ gr/cm}^2 = 1,026 \text{ kg/cm}^2$$

A esta presión se la llama Presión Hidrostática [PHid]. A los efectos prácticos, para el buceo deportivo se admite que la presión ejercida por una columna de agua de 10 metros de altura es de 1 kg/cm^2 , lo cual quiere decir que cada 10 m que desciende un buzo, la presión que soporta su cuerpo se incrementa en 1 Bar.

Las unidades y las equivalencias entre ellas, normalmente utilizadas para medir la Presión [P] son:

	at	mm Hg	Kg / cm ²	m H ₂ O	PSI	bar	mlbar
1 at	1	760	1	10	14,7	1,033	1033

Tabla 6.d: Unidades de Presión

Presión absoluta

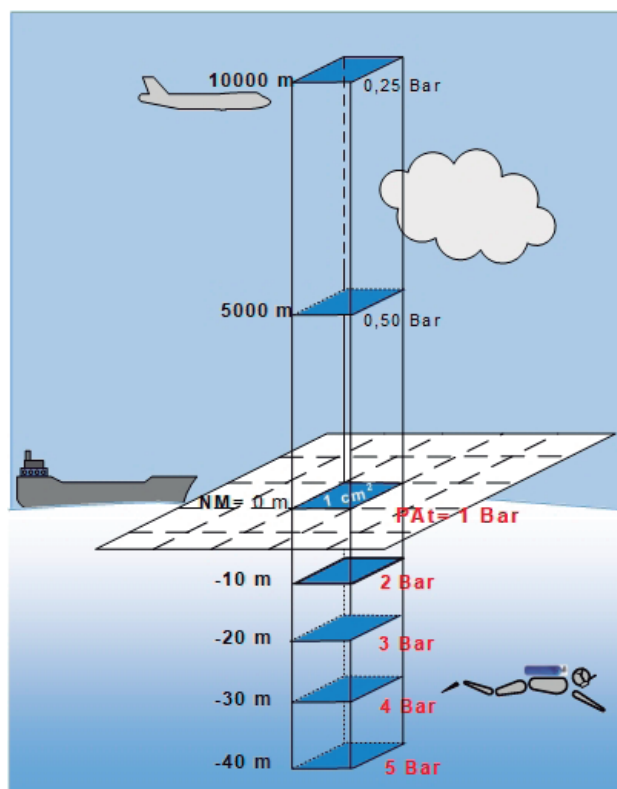


Figura 6.18: Presión Absoluta a Nivel del Mar

Se llama Presión Absoluta [PAbs] a la suma de la Presión Hidrostática [PHid] más, la Presión Atmosférica [PAAt].

$$PABS = PHid + PAAt$$

PROF	PAt	PHid	PAbs
m	at	at	at
0	1,00	0,00	1,00
-10	1,00	1,00	2,00
-20	1,00	2,00	3,00
-30	1,00	3,00	4,00
-40	1,00	4,00	5,00

Tabla 6.e: Presión Absoluta a NM

Esta es la presión que soporta un buzo durante la inmersión. A Nivel del Mar [NM], la Presión Absoluta [PAbs], varía linealmente con la profundidad, en 1 Bar cada 10 m según se demostró en el párrafo Presión Hidrostática.

En Ambientes Hipobáricos, es decir en alturas superiores a los 300 metros sobre el Nivel del Mar, la Presión Atmosférica [PAt] varía con cada altitud, debemos preguntarnos que sucede con la Presión Absoluta [PAbs] cuando un buzo desear bucear a diferentes alturas por encima de la Cota Cero.

Variación de la presión absoluta con la altitud

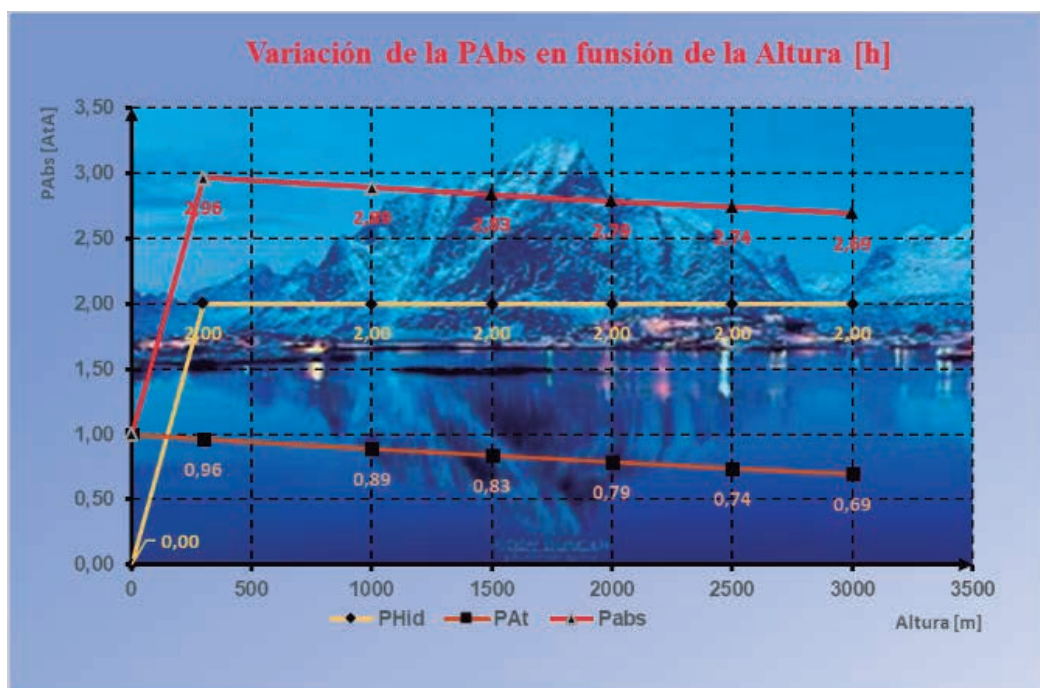


Figura 6.19: Variación de la Presión Absoluta

El agua, como la mayoría de los líquidos, se puede considerar incompresible, por eso la Presión Hidrostática [PHid] varía en forma lineal con la Profundidad [Prof].

El aire por ser una mezcla de gases es compresible, por lo tanto, a diferencia del agua, la variación de la presión en la atmósfera no es lineal. En consecuencia, la Presión Atmosférica [PAt], variará con el peso de la capa de aire que se encuentra según las diferentes alturas.

Desde el punto de vista de un buzo, la Presión Hidrostática [PHid] varía en forma continua y lineal al ir ganando profundidad, mientras que la Presión Atmosférica [PA_t] lo hará por saltos según la Altura [h] a que se encuentre el espejo de agua, lo cual la convierte en una característica del lugar.

■ Cálculo de la presión absoluta y la profundidad

A partir de la sencilla expresión matemática siguiente, es posible calcular la Presión Absoluta en Bar, conociendo la Profundidad en metros.

$$PAbs[Bar] = \frac{Pr\ of\ [m]}{10} + 1 \quad (1)$$

Ejercicio:

Calcular la Presión Absoluta [Bar], sabiendo que un buzo se encuentra 10,00 m

De (1):

$$PAbs[Bar] = \frac{10[m]}{10} + 1 = 1 + 1 = 2\ Bar$$

Recíprocamente es posible calcular la Profundidad en metros, conociendo Presión Absoluta en Bar:

$$Pr\ of\ [m] = (PAbs[Bar] - 1) \times 10 \quad (2)$$

Ejercicio:

Calcular a que Profundidad [m] se halla un buzo sabiendo que soporta una Presión Absoluta de 3 Bar:

De (2):

$$Pr\ of\ [m] = (3\ Bar - 1) \times 10 = 20\ m$$

Instrumentos de medición

Si sobre el extremo cerrado del tubo en forma de "J" del experimento de Boyle se adiciona un cuadrante con una escala convenientemente graduada, se obtiene un instrumento llamado manómetro.

Los manómetros son instrumentos utilizados para medir presiones, los hay de diferentes tipos, según el principio de funcionamiento o el dispositivo que se utilice para su construcción. Por ejemplo, los manómetros de columna como el descrito anteriormente

Los más utilizados en el campo del buceo son los manómetros del tipo “Tubo de Bourdon”

Manómetros tipo “Tubo de Bourdon”

Los Manómetros Mecánicos o Analógicos, funcionan a partir de un dispositivo llamado “Tubo de Bourdon”.

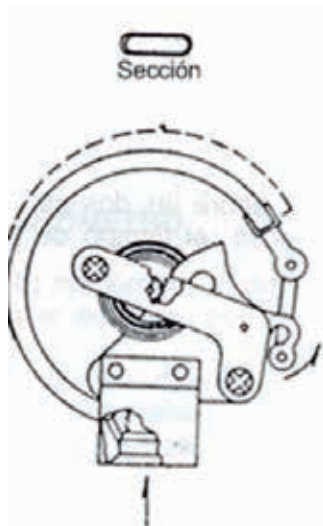


Figura 6.20: Profundímetro de Tubo de Bourdon Abierto

Existen dos tipos de “Tubo Bourdon”:

1. Manómetros de Tubo de Bourdon Abierto.
2. Manómetros de Tubo de Bourdon Cerrado.

Como muestran las Figuras 6.20 y 6.21, ambos tipos constan de una caja rígida construida en metal o plástico, dentro de la cual se instala el tubo. En la parte superior de la caja, va instalado un cristal o un plástico transparente que cuyas funciones son proteger la aguja indicadora y, permitir la lectura de la presión medida sobre un cuadrante graduado.

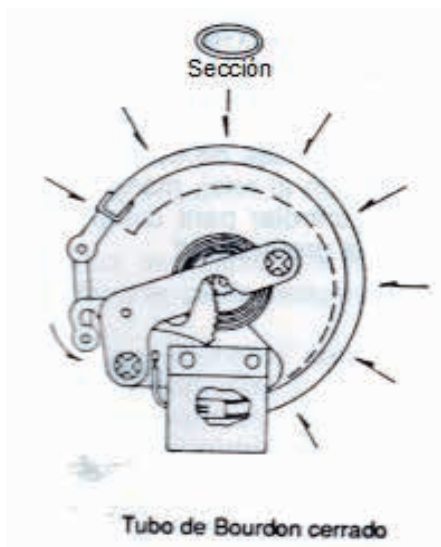
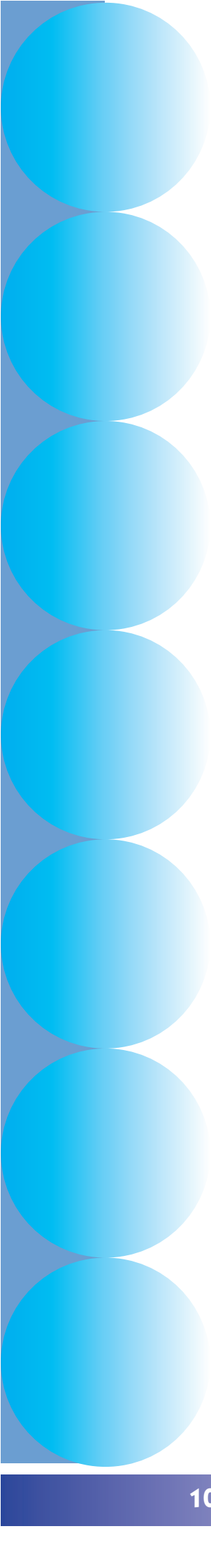


Figura 6.21: Profundímetro de Tubo de Bourdon Cerrado.



En los manómetros del tipo Tubo de Bourdon Abierto, consiste en un tubo de sección plana, curvado en forma de “medialuna”, con el extremo abierto en contacto con el agua. Cuando existe un incremento de presión dentro del tubo, este tiende a enderezarse, de la misma forma que se estira manguera que se halla enrollada, cuando se ingresa agua a presión en su interior. El movimiento producido se transmite por el mecanismo de relojería a la aguja y, esta marca la presión existente sobre el cuadrante calibrado.

El Tubo de Bourdon Cerrado, consiste en un tubo de sección ovalada curvado en forma de “medialuna”, con un extremo fijo a la caja y el otro unido a un mecanismo de relojería del tipo piñón y corona que acciona una aguja, la cual indica el valor de la presión medida sobre un cuadrante graduado en una cierta escala.

En los manómetros del tipo Tubo de Bourdon Cerrado, este extremo se fija al cuerpo de la caja, generalmente llena con un aceite inerte cuya finalidad es transmitir la presión sobre la superficie del tubo. Al actuar la presión exterior sobre la caja y esta sobre el aceite inerte, se contrae el tubo que tiende a cerrar su curvatura, este movimiento se transmite al mecanismo de relojería que acciona la aguja, con lo cual es posible leer la presión en la escala marcada en el cuadrante.

Los Manómetros Mecánicos o Analógicos, tipo “Tubo de Bourdon”, son por su sencillez y eficiencia, uno de los instrumentos más cómodos y confiables. Tienen un sinnúmero de aplicaciones en la industria y en nuestro deporte son a base de diferentes tipos de manómetros sumergibles y de superficie y, profundímetros analógicos.

Profundímetros digitales

Con el advenimiento de la tecnología del silicio y el desarrollo de los microchips, los sensores y transductores de presión, que no sean influenciados por la temperatura, las baterías de larga vida y la pantalla de cristal de cuarzo líquido, los fabricantes de equipos de buceo pusieron su mirada en el desarrollo de instrumentos para medir la profundidad que no fueran mecánicos y que aprovechando las ventajas de la electrónica cumplieren alguna otra función extra.

El diagrama de bloques muestra los diferentes órganos del instrumento y como se interrelacionan, los controles externos permiten acceder a los diferentes datos almacenados en la memoria, mientras que el sensor y transductor de presión miden presión absoluta y la transforman en una señal que es enviada al microprocesador que la procesa y almacena en la memoria.

Estos tienen capacidad para almacenar conjuntos de datos importantes, de hasta cuatro inmersiones previas como son la profundidad máxima y el tiempo de fondo de cada una de ellas.

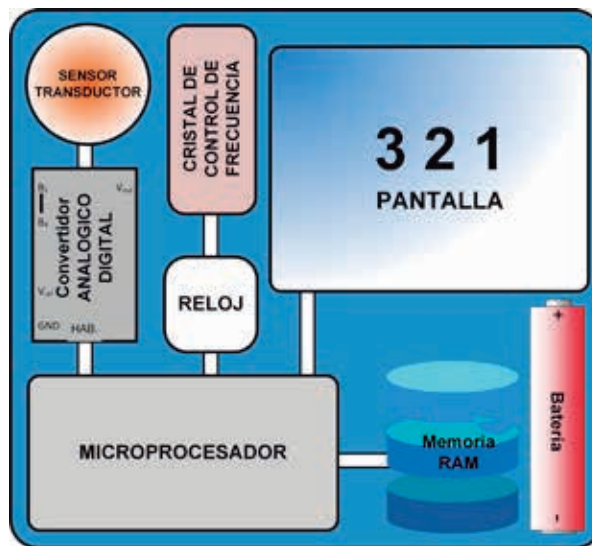


Diagrama de bloques de un profundímetro digital

Otros datos útiles que suelen proporcionar estos instrumentos son velocidad de ascenso, tiempo de fondo y temperatura del agua.

Pensado principalmente para buceadores técnicos, el DIGITAL 330M es un sistema ideal también para buceadores noveles o como útil instrumento de apoyo para todos los buceadores con cualquier nivel de experiencia. Gracias a su tecnología de última generación, muestra de forma fiable información esencial como la profundidad, la temperatura, el tiempo en el fondo y la velocidad de ascenso. El DIGITAL 330M ofrece una excelente precisión electrónica en todas las situaciones de buceo.

- Gracias a su avanzada tecnología, este compacto sistema de información aporta gran cantidad de datos.
- Facilita la profundidad real y máxima, la velocidad de ascenso, el tiempo de inmersión en minutos y la temperatura.
- Su función de encendido/apagado automático ofrece total disponibilidad tras una rápida autocomprobación.
- Visualización de varias velocidades de ascenso en porcentaje y aviso de ascenso rápido.
- Apto para una profundidad máxima de 330 m, resulta adecuado para todas las situaciones de buceo profundo técnico.
- Muestra el intervalo de superficie durante 24 horas para mayor seguridad y comodidad.
- El diario muestra la información de las últimas 20 inmersiones con fines de revisión y análisis.
- Compensación automática de la altitud al cambiar de lugar de buceo.

Sistema de medición	Versión Métrica
Fondo fluorescente	No
Peso	0.3 lb
Actividad	Técnico

Principio de Pascal

Blas Pascal (1623-1662) matemático, físico y filósofo francés. Publico varias obras, en 1642 diseñó y construyó la primera máquina de cálculos mecánica, realizó estudios sobre geometría, el vacío y la estática y dinámica de los fluidos

En 1653, enunció un principio que describe como se transmiten los efectos de las presiones cuando actúan sobre la masa de un fluido. Este, no se trata de un principio físico aislado, sino una consecuencia necesaria de las leyes de la mecánica. Frecuentemente se enuncia como:

“La presión aplicada a un fluido encerrado, se transmite sin disminución a cada punto del fluido y a las paredes del recipiente”

En palabras sencillas Pascal nos dice que, la presión ejercida sobre un punto cualquiera de la masa de un fluido, se transmite en todas direcciones y sobre las paredes del recipiente que lo contiene, en forma instantánea y con igual intensidad.

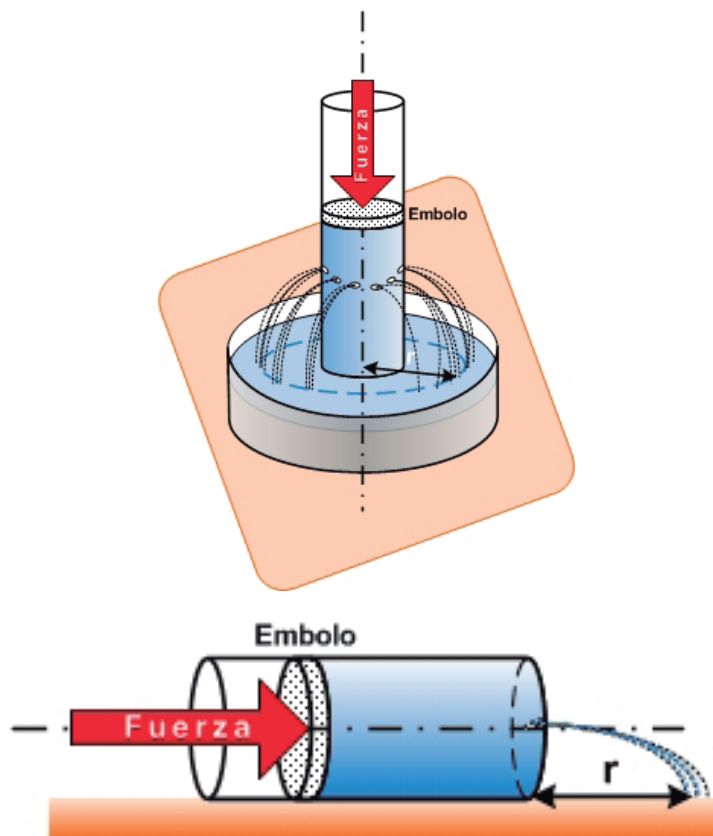


Figura 6.22: Demostración del Principio de Pascal

El Principio de Pascal se demuestra con un sencillo experimento, si primero en un cilindro con émbolo, se realizan una serie da agujeros a una misma altura en su cuerpo, se lo llena con agua y, se ejerce una fuerza sobre el émbolo, se verá que, al caer el agua, lo hace sobre una circunferencia de radio r , lo cual demuestra que la presión se transmitió con igual intensidad sobre las paredes del cilindro.

En un segundo paso, se toma otro cilindro con embolo idéntico al anterior y, se realiza un agujero en el fondo del mismo. Y se repite el experimento en anterior. Se verá entonces que el chorro de agua cae a una distancia r , igual a la anterior. Esto demuestra que la fuerza se transmitió con igual intensidad sobre el fondo también, con lo cual queda demostrado el Principio de Pascal.

Pero, ¿qué sucede cuando un buzo inspira aire de su regulador?

Pensando ahora como buzos vemos que el aire inhalado a presión, ingresa a un sistema de tubos comunicantes formado por todas las cavidades aéreas (vías aéreas, odio, senos frontales, maxilares, etmoidales y esfenoidales) y, según el Principio de Pascal, ejerce presión, con igual intensidad, en forma instantánea en el interior de todas ellas y sobre sus paredes.

Este fenómeno posibilita que se igualen las presiones internas del cuerpo y la absoluta externa, poniendo su relación 1:1. Esta relación idéntica de presiones, para el organismo represente una condición similar a la que tendría si se hallara a nivel del mar, posibilitando de este modo el normal desempeño de los músculos involucrados en la inspiración durante las inmersiones.

Principio de Arquímedes

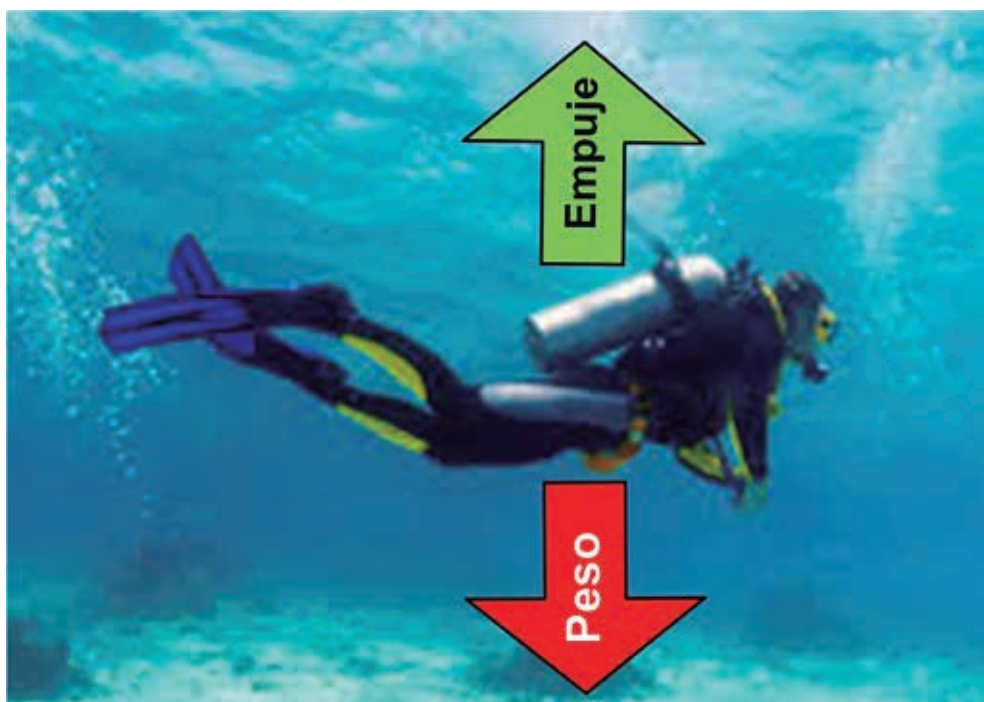


Figura 6.23: Principio de Arquímedes

Arquímedes (287 – 212 a de C.), matemático, físico, técnico de la antigua Grecia, enseñó el cálculo de la raíz cuadrada, determinó el perímetro de círculo y el valor aproximado del número π (Pi). En física descubrió las leyes del Centro de Gravedad, del Plano Inclinado, la Palanca, y el Empuje de un cuerpo sumergido. Se le atribuye inventos tales como, la catapulta, espejos incendiarios, el tornillo para subir agua a niveles diferentes, sistema de riego y el aparejo.

El principio de Arquímedes dice:

“Todo cuerpo parcial o totalmente sumergido en el seno de un fluido, experimenta una fuerza de abajo hacia arriba, llamada Empuje [E], igual al peso del volumen [V] del fluido desalojado”

Es importante notar que el Empuje [E] depende solo de la parte sumergida del cuerpo, por eso el principio aclara taxativamente: parcial o totalmente sumergido.

Como se puede observar en la figura, sobre un buzo sumergido actúan dos fuerzas de igual dirección y sentido contrario. La primera de ellas es el Peso [P] del buzo que actúa hacia abajo, orientada hacia el centro de la Tierra. Mientras que la segunda, el Empuje [E] actúa de abajo hacia arriba sobre la misma dirección, pero en sentido contrario.

Puesto que el Empuje [E], depende del Volumen [V] del cuerpo sumergido y de la Densidad [δ] del fluido, en el caso de nuestro buzo se tendrá:

$$E = \delta_{H_2O} * V \quad [E] = \frac{kg}{dm^3} * dm^3 = kg$$

De la relación ente el Peso [P] y el Empuje [E], se desprende el concepto de Flotabilidad [F].

Flotabilidad

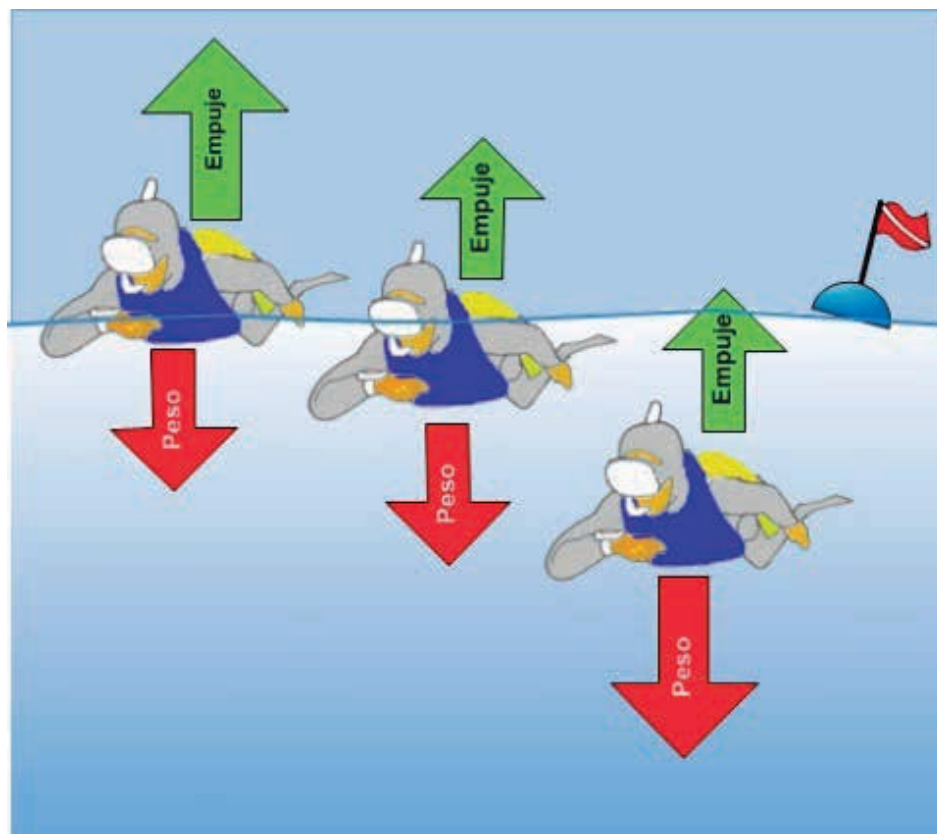


Figura 6.24: Flotabilidad Positiva; Neutra; Negativa.

Se define como Flotabilidad [F], a la suma algebraica de las fuerzas que actúan cuando un cuerpo se halla sumergido. Es decir, su Peso [P] y Empuje [E]:

$$F [kg] = E [kg] - P [kg]$$

Si se observa la fórmula de la Flotabilidad [F], se deduce que existen tres alternativas posibles:

Flotabilidad Positiva: cuando el Peso [P] del cuerpo, es menor que el Empuje [E], por lo tanto, este flota.

Flotabilidad Neutra: cuando, Peso [P] y Empuje [E] son iguales. En cuyo caso se dice que hay Equilibrio Hidrostático.

Flotabilidad Negativa: cuando el Peso [P] del cuerpo, es mayor que el Empuje [E], por lo tanto, este se hunde.

Flotabilidad del cuerpo humano

Los tejidos del cuerpo humano en mayor o menor grado están formados por agua. Esto hace que este tenga aproximadamente en su constitución un 80% de agua y por lo tanto su densidad promedio sea muy similar al del agua salada, particularidad que hace que un hombre se halle en un estado de Flotabilidad Neutra, permitiéndole flotar con gran facilidad.

Además, el cuerpo cuenta con dos grandes sacos de aire, que son sus pulmones, de los cuales puede regular su volumen en forma voluntaria, controlando la cantidad de aire que inhala y exhala, lo cual permite regular la flotabilidad. Si se flota en posición vertical en forma estática, es decir sin mover los brazos y/o piernas, inhalando profundamente se notará que el cuerpo asciende y es posible flotar con la cabeza fuera del agua con facilidad, mientras que si se exhala en forma controlada el cuerpo se hunde suavemente.

Es recomendable practicar esta técnica en una piscina o en aguas calmas, hasta dominarla pues permite descansar después de un esfuerzo intenso, si no se cuenta con un equipo básico.

Reflotamiento con aire

La utilización del aire comprimido para elevar objetos pesados que se hallan sumergidos, data de la década de 1920. El Reflotamiento con Aire, es el empleo práctico de este, que por su simplicidad, mejor ejemplifica la aplicación del Principio de Arquímedes y la Ley de Boyle-Mariotte.

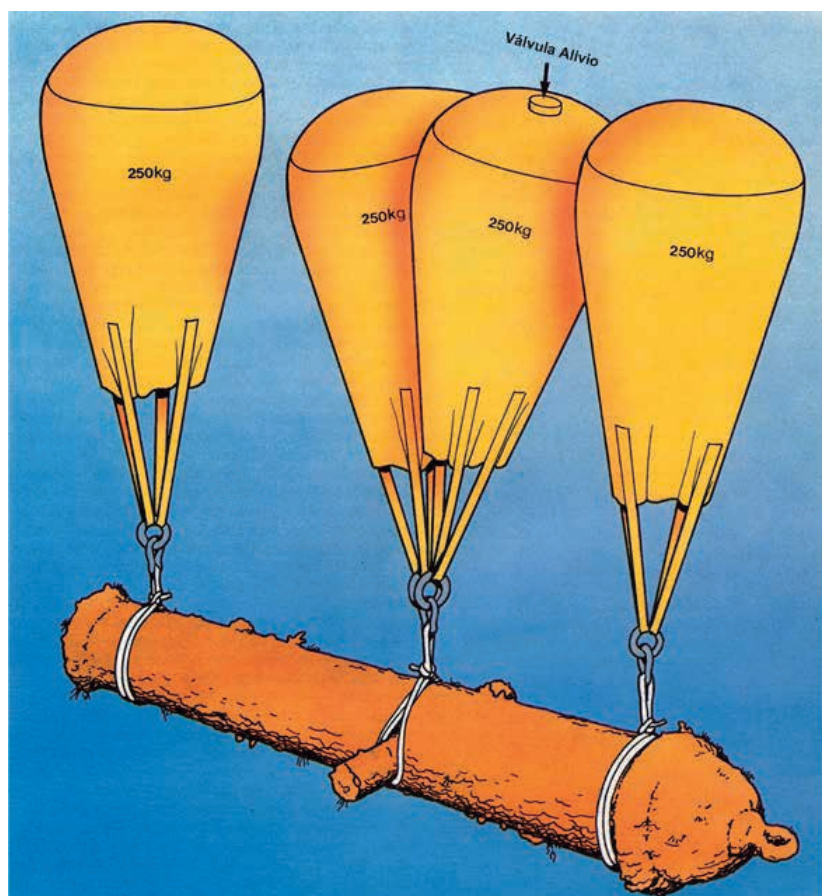


Figura 6.25: Reflotamiento con Aire

El principio para elevar objetos pesados que se hallan sumergidos es muy simple. Se basa en que un litro de Agua [H_2O] pesa aproximadamente un kilogramo, entonces si se consigue desplazar con algún dispositivo un litro de agua con aire, se habrá obtenido un Empuje [E] de un kilogramo. Así, un objeto que tiene un Empuje [E] de 50 Kg, requerirá 50 lt de aire a Presión Atmosférica [PA_t] para ser elevado a superficie. Esta primera parte de la resolución de nuestro problema es simplemente la aplicación del Principio de Arquímedes.

Como nuestro objeto se halla sumergido a una cierta Profundidad [P] en la cual la Presión Absoluta [P_{Ab}] es superior a la Atmosférica (1 Bar), por imposición de la Ley de Boyle-Mariotte, el volumen de aire necesario en la misma será tantas veces superior como lo sea la Presión Absoluta [P_{Ab}].

A este volumen de aire se lo llama, Volumen de Aire Equivalente en Superficie [VAES], y representa la cantidad de aire requerido a la profundidad que se encuentra el objeto a refloating, e indica cuanto aire se consumirá en la operación de refloating. Por lo tanto, si nuestro objeto que posee un Empuje [E] de 50 Kg, requiere 50 lt de aire a Presión Atmosférica [PA_t], si se halla sumergido a una Profundidad [P] de 20 m (3 bar), requerirá 150 lt (50 lt/bar x 3 bar) de aire para ser elevado. Esta segunda parte de la resolución de nuestro problema, es la aplicación de la Ley de Boyle-Mariotte, la cual veremos en Estado Gaseoso.

Los dispositivos utilizados normalmente para elevar desde el fondo objetos sumergidos son las Bolsas de Reftotamiento. Estas generalmente tienen forma de pera invertida con el extremo inferior abierto, su forma es muy importante pues contribuye al mantenimiento de la estabilidad y el control del conjunto (bolsa/s + objeto) durante el ascenso. Se las encuentra con diferentes capacidades de elevación, desde unos pocos kilogramos hasta aquellas de gran porte capaces de elevar hasta 10000 kg o más, estas últimas suelen contar con válvulas de vaciado para controlar la velocidad de ascenso de la misma.

Cuando se planifica una operación de reftotamiento utilizando aire, una vez realizados los cálculos para determinar el Volumen de Aire Equivalente en Superficie [VAES], se recomienda utilizar más de una Bolsa de Reftotamiento, pues este tipo de arreglo brinda mayor control en el momento del despegue del objeto del fondo y de su velocidad durante el ascenso.

Ejemplo:

Se desea reftotar un viejo cañón que reposa sobre un lecho de piedra (por lo cual no sufre el efecto de succión del limo de este), a 20 m de Profundidad [P]. A partir de las marcas del armero que lo fabricó y los relevamientos "in situ", se obtuvieron los antecedentes históricos y datos técnicos el mismo, por lo cual se conoce que su peso es de 1.250 kg y su geometría la que muestra la figura 6.25. Para la operación se cuenta con bolsas de reftotamiento, de 200 kg y 250 kg de capacidad de elevación. Considerar que la Densidad del agua salada es: 1,025 kg/l. Determinar:

1. El Volumen de Aire Equivalente en Superficie [VAES].
2. El número y combinación de Bolsas de Reftotamiento a utilizar.

Para determinar el Volumen de Aire Equivalente en Superficie [VAES], se aplica primero el Principio de Arquímedes. Según este:

$$F = W - E = W - \delta \times V \quad (1)$$

Como el Empuje [E], depende del Volumen [V] del cuerpo sumergido debemos calcular el mismo. Para esto se asimila la forma del objeto a un cuerpo geométrico sencillo, como por ejemplo un cilindro, cubo, prisma, cono, etc., cuya fórmula del volumen es conocida y fácil de calcular. Para objetos con formas complejas o con grandes variaciones, como por ejemplo un ancla o un avión, se puede descomponer en varias figuras geométricas sencillas y sumar sus volúmenes. Para el caso de nuestro viejo cañón lo asimilamos a un cilindro cuya base es de 40 cm de diámetro y su altura [h] de 2,40 m, por lo tanto, su Volumen [V] es:

$$V = 2 \times \Pi \times r^2 \times h = 2 \times 3,14 \times 0,20^2 \times 2,40 = 0,603 \text{ m}^3 \cong 600 \text{ l}$$

Reemplazando en (1)

$$F = W - \delta \times V = 1250 \text{ kg} - 1,025 \frac{\text{kg}}{\text{l}} \times 600 \text{ l} = 635 \text{ kg}$$

Es decir que nuestro objeto tiene un Peso Aparente [PAp] a elevar de 635 kg. Por lo tanto, el Volumen de Aire Equivalente en Superficie [VAES], se calcula como:

1.- Se calcula la cantidad de aire requerida a Presión Atmosférica:

$$V_A \text{ [l]} = \frac{F \text{ [kg]}}{\delta \left[\frac{\text{kg}}{\text{l}} \right]} = \frac{635 \text{ kg}}{1,025 \frac{\text{kg}}{\text{l}}} = 620 \text{ l}$$

2.- Como nuestro viejo cañón se encuentra a 20 m de profundidad (3 bar), el VAES se calcula con una simple regla de tres simple:

$$\begin{array}{l} 1 \text{ bar} \dots\dots\dots 620 \text{ l} \\ 3 \text{ bar} \dots\dots\dots x \end{array}$$

de donde:

$$x = \frac{3 \text{ bar} \times 620 \text{ l}}{1 \text{ bar}} = 1860 \text{ l}$$

Entonces para el ejemplo planteado el Volumen de Aire Equivalente en Superficie [VAES], es de 1860 l.

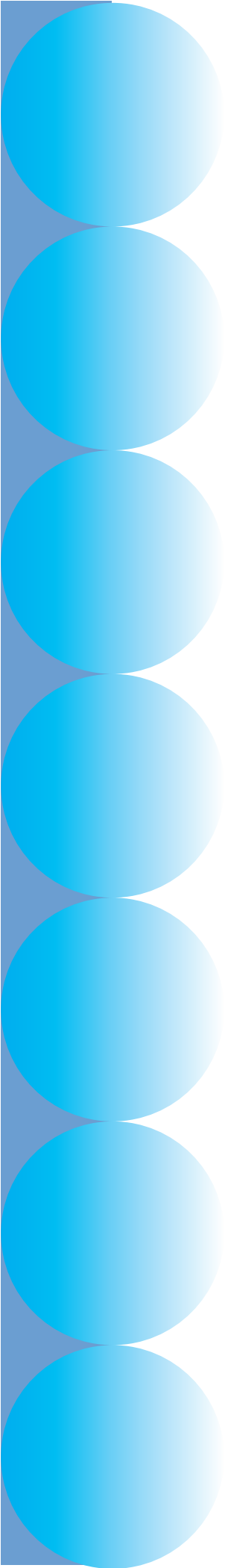
Para calcular la cantidad de Bolsas de Reflotamiento, tenemos que:

$$N \text{ Bolsas} = \frac{VAES}{Capacidad} = \frac{620 \text{ l}}{200 \frac{\text{l}}{\text{bolsa}}} = 3,10 \text{ bolsas}$$

De donde se deduce que para la operación planteada se deben utilizar dos bolsas de refltamiento de 200 l de capacidad y una de 250 l de capacidad. Las cuales se distribuirán las de 200 l de capacidad una en cada extremo de la pieza y, la de 250 l de capacidad sobre el baricentro de la misma.

El estado gaseoso





Teoría cinética de los gases

El comportamiento de los gases ante las variaciones de la Presión [P] y la Temperatura [T], se conoce como la Teoría Cinética de los Gases. La palabra cinética, proviene del griego (cineo) que significa movimiento, y no existe expresión más acertada para describir que sucede en el seno de una masa gaseosa.

Como toda materia, los gases se hayan formados por moléculas, estas se mueven constantemente, con un movimiento rectilíneo, uniforme, y en todas direcciones. Este movimiento es continuo y caótico, chocando entre ellas y con las paredes del recipiente que lo contiene. Estos choques permiten percibir y medir, la Presión [P] que la masa de gas ejerce en el interior y sobre las paredes del recipiente.

La velocidad con que se mueven las moléculas encerradas en el recipiente, depende directamente de dos factores:

- 1) de su masa molecular
- 2) de su energía.

Se ha demostrado que al variar la Temperatura [T], la velocidad de cada molécula aumenta o disminuye, incrementando o disminuyendo la presión interior del recipiente que contiene el gas. Como se ha desarrollado en las Unidades 02 - La Materia y sus Estados y Unidad 04 – Los Gases y Mezclas Gaseosas, cada gas tiene una masa molecular propia, determinada por la estructura de sus átomos (cantidad de Neutrones [N], Protones [P+] y Electrones [E-], por lo tanto, a una misma Temperatura [T], cada gas tendrá su propia energía cinética. Así, a una temperatura dada, los gases con menor masa molecular se moverán a mayor velocidad que aquellos que poseen una masa molecular mayor.

Pero, si la masa gaseosa se halla compuesta por una mezcla de gases, la combinación de las masas moleculares y las velocidades de las moléculas de cada gas, da como resultado que la energía cinética es única para toda la masa.

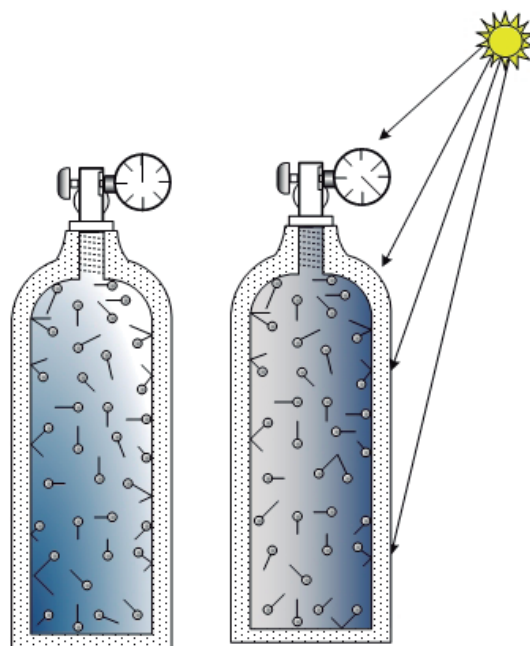


Figura 7.1: Teoría Cinética de los gases

Si un botellón de buceo contiene un número determinado de moléculas de gas, la Presión [P] en su interior dependerá entonces de la cantidad de moléculas y de su velocidad. Por ejemplo, si se tiene un cilindro de un Volumen [V] y en su interior hay un mol de Oxígeno [O_2], se tendrán 32 moléculas de este que ejercen una Presión [P] sobre las paredes del recipiente. Si incrementa la masa del gas a 2 moles, se duplicará el número de moléculas en el interior del botellón, se tendrá entonces 64 moléculas, al ser el volumen del recipiente invariable, los choques entre ellas y las paredes del recipiente se duplicará también y por consiguiente la Presión [P] interior en igual valor.

Pensando otro modelo. Si se mantiene el número original de 32 moléculas, pero el volumen interno del recipiente se reduce a la mitad, al haber igual número de moléculas en la mitad el espacio, se multiplicará al doble la cantidad de choques entre moléculas y con las paredes, por lo tanto, la Presión [P] interna del recipiente también se duplicará.

De forma análoga a los casos descritos, si se reduce la masa de Oxígeno [O_2] a medio mol, tendremos ahora la mitad el número de moléculas, es decir 16 moléculas, entonces la Presión [P] interna del recipiente caerá en igual valor. Y si mantiene el número de moléculas, pero se duplica el volumen, igualmente la Presión [P] interna del recipiente se disminuirá a la mitad.

Desarrollando un último modelo, si se mantiene constante el Volumen [V] del recipiente y el número de moléculas (las 32 iniciales), pero se calienta el recipiente. La energía de cada molécula de gas se incrementará, aumentando entonces la velocidad de cada una de ellas, con lo cual chocarán más veces entre ellas y con las paredes del recipiente y, como consecuencia directa de esto la Presión [P] interior del recipiente aumentará.

De lo anterior se puede decir que la Teoría Cinética de los Gases se sustenta en seis postulados:

1. Los gases están compuestos por moléculas.
2. Las moléculas se hallan en movimiento constante, rectilíneo y uniforme.
3. Las moléculas chocan frecuentemente entre ellas y con las paredes del recipiente que las contiene.
4. Bajo condiciones normales la distancia entre dos moléculas es infinitamente mayor que su tamaño. Es por esta causa que los gases son compresibles.
5. Las moléculas se mueven en todas las direcciones y su velocidad está regida por su temperatura. A una temperatura determinada, el promedio de energía de las moléculas de un gas, es la misma para todos los gases.
6. Los choques entre moléculas son perfectamente elásticos, esto significa que en una colisión las moléculas de un gas no ceden ni toman energía.

Leyes de los gases

Los gases en forma individual y las masas gaseosas producto de la mezcla de gases, están sujetas a tres variables que se hallan íntimamente relacionadas:

PRESIÓN [P]

VOLUMEN [V]

TEMPERATURA [T]

La Teoría Cinética de los Gases, describe los cambios que se producen en el seno de una masa gaseosa, cuando se modifica una de estas variables, y además establece que el comportamiento de cada gas será el mismo que el de los demás gases en una mezcla gaseosa.

Por lo tanto, la Teoría Cinética de los Gases, establece las reglas para predecir como van a cambiar las variables de un gas cuando una de ellas varía. Para el desarrollo de los Modelos Matemáticos de Descompresión, es fundamental predecir cuál será el comportamiento de un gas cuando se modifica una de sus variables, puesto que este hecho influye directamente en la disolución y eliminación de los volúmenes del gas inerte (N_2 ; He; Ar).

Cuatro fueron los científicos que estudiaron y describieron el comportamiento de los gases, conformando un conjunto de tres leyes que se conoce bajo el nombre genérico de Leyes de los Gases, y cada ley lleva el nombre de estos en su memoria. Ellos son:

Robert Boyle (1627 – 1691)

Joseph Gay Lussac (1768 - 1850)

Edme Mariotte (1620 – 1694)

John Dalton (1766 – 1844)

Estas variables son dependientes entre si, pues una variación en una de ellas afecta a las otras dos. Las leyes de los Gases, establecen las relaciones entre dichas variables y son la base para la explicación de muchos de los fenómenos físicos y fisiológicos que influyen sobre el cuerpo humano durante una inmersión. Por eso su conocimiento y comprensión es fundamental para tener buceos seguros y placenteros.

Ley de Boyle - Mariotte

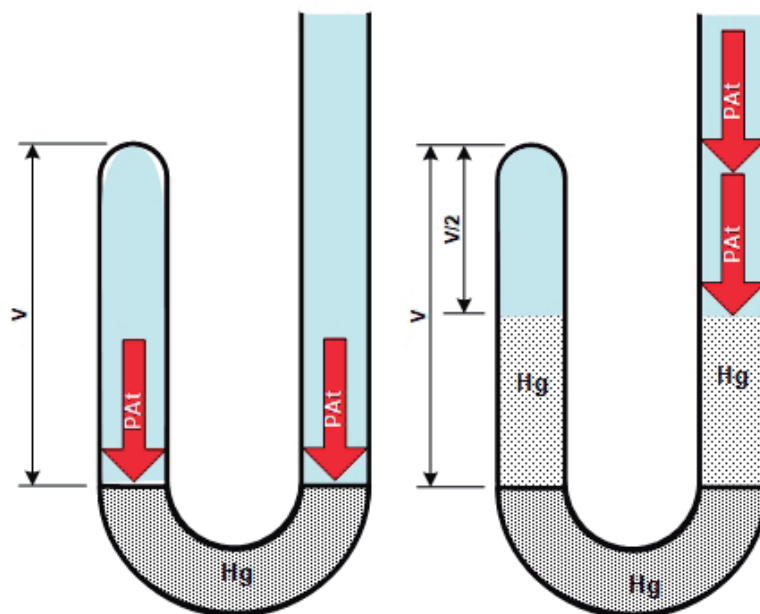


Figura 7.2: Experimento de Boyle

La ley de Boyle – Mariotte, que recibe su nombre en memoria del físico y químico británico Robert Boyle (1627 – 1691) y del físico francés Edme Mariotte (1620 – 1694).

Para 1660, R. Boyle llevaba a cabo experimentos buscando una relación entre la Presión [P], la Temperatura [T] y el Volumen [V] de una masa gaseosa. Este conocía los descubrimientos de Torricelli, quien había logrado medir por primera vez la Presión Atmosférica [PAT], y los experimentos de Blas Pascal, quien había establecido como se transmitía la presión en el seno de un fluido.

Robert Boyle ideó un experimento muy sencillo, pero eficiente. Tomó un tubo con forma de “J” cerrado en extremo de su rama más corta, por el extremo abierto vertió Mercurio [Hg] hasta que la altura de este en ambas ramas estaba en equilibrio. En ese punto, la presión del gas en la rama cerrada es igual a la Presión Atmosférica [PAT], luego siguió incorporando Mercurio [Hg], hasta que el volumen de la rama más corta se redujo a la mitad. Al medir la cantidad de Mercurio [Hg] total utilizado para obtener este segundo volumen comprobó que correspondía a dos veces 760 mm, valor que coincidía con la medida de la Presión Atmosférica [PAT] realizada por Torricelli. De este modo infirió que para reducir el Volumen [V] de la masa gaseosa a la mitad, se requirió de una presión igual a dos veces la Presión Atmosférica [PAT].

Para la misma época E. Mariotte en Francia, llevaba adelante experimentos similares que lo llevaron a las mismas conclusiones sobre las relaciones entre la Presión [P] y el Volumen [V] de una masa gaseosa.

La Ley de Boyle – Mariotte se expresa:

“A Temperatura [T] constante [k], el Volumen [V] de una masa gaseosa es, inversamente proporcional a la Presión que soporta”

Su expresión matemática es:

$$P \times V = k \quad (a \ T = k)$$

como correlato de la Ley de Boyle – Mariotte se puede expresar que:

“A Temperatura [T] constante [k.], de la densidad [δ] varía directamente con la Presión [P] que soporta la masa gases”

Supongamos un globo que contiene un Volumen [V] a aire, que lo consideraremos unitario a Nivel del Mar, donde la presión Absoluta [PAbs] es de 1 bar. Si se lo sumerge a 10 m, donde la Presión Absoluta [PAbs] es de 2 bar, se verá que su volumen [V] se reduce a la mitad. Si se incrementa la profundidad a 20 m, donde la Presión Absoluta [PAbs] es 3 bar, el Volumen [V] del globo se reducirá a la tercera parte. Si se continúa descendiendo a 30 m, 40 m, las Presiones Absolutas [PAbs] se incrementarán a 4 bar, 5 bar etc. en tanto que el Volumen [V] se irá reduciendo a la cuarta parte, quinta parte, etc.

Como los gases ocupan todo el volumen del recipiente que los contiene y, su compresibilidad es alta, al reducirse el Volumen [V] del contenedor por el aumento de la Presión Absoluta [PAb], las moléculas del gas se hallan más cerca unas de las otras, la consecuencia de esto es el incremento de la Densidad [δ] del gas en forma directa al aumento de la Presión Absoluta; es decir que a 10 m su Densidad [δ] será el doble, a los 20 m el triple de la que corresponde a superficie y así sucesivamente.

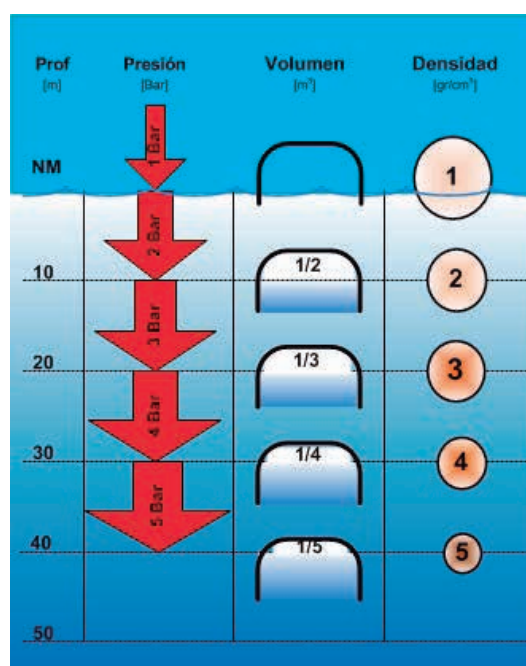


Figura 7.3: Ley de Boyle - Mariotte

Este incremento de la Densidad $[\delta]$ es un factor a tener muy en cuenta puesto, que a mayor profundidad de Buceo, mayor será la Densidad $[\delta]$ del aire o de cualquier mezcla de gases y, más dificultoso será su pasaje a través del regulador y las vías aéreas, incrementando así el esfuerzo respiratorio y consecuentemente la fatiga respiratoria.

Durante una inmersión en apnea, los volúmenes internos (pulmones, aparato digestivo, etc.), irán disminuyendo. Lo mismo sucede con los volúmenes externos (traje isotérmico, luneta, etc.), este efecto hace que varíe el empuje por la disminución del volumen total, lo cual se percibe como una disminución de la Flotabilidad $[F]$.

Si ahora se infla el globo a cierta profundidad con una cantidad determinada de aire, al ascender su Volumen $[V]$ se expandirá por la reducción de la Presión Absoluta $[PAbs]$, siendo su Volumen $[V]$ un cuarto mayor, un tercio mayor la un cincuenta por ciento mayor y así continuamente.

Este fenómeno de expansión del volumen se presenta en inmersiones con aparatos autónomos. El accidente más dramático sucede cuando, al ascender el buzo no exhala, entonces los pulmones incrementarán su volumen pudiendo llegar al límite de dañarse seriamente el tejido de las paredes del pulmón, causando un grave accidente.

Ejercicio:

Si un botellón de buceo aloja 2400 litros de aire a su Presión de trabajo (200 Bar), determine el volumen de aire disponible a las siguientes Profundidades $[P]$: 10 m, 20 m, 30 m, 40 m.

Prof	PAbs
- m -	- Bar -
10	2
20	3
30	4
40	5

Tabla 7.a:
Prof vs. PAb

La Ley de Boyle – Mariotte, permite calcular la reducción de Volumen $[V]$, cuando se incrementa la Presión $[P]$. Tratándose de una inmersión al referirnos a la Presión $[P]$ que soporta la masa de aire, estamos hablando de la Presión Absoluta $[PAbs]$ ($PA_t + PHid$). Recordando la fórmula de $PAbs$, conociendo la Profundidad $[Prof]$ en metros y reemplazando en ella, se tiene:

$$PAbs [Bar] = \frac{Prof [m]}{10} + 1$$

Sustituyendo cada Presión Absoluta [PAb] en la Ley de Boyle – Mariotte:

$$\text{Para } 10 \text{ m} \Rightarrow P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2 \Rightarrow 2.400 \text{ l} \times 1 \text{ Bar} = 2 \text{ Bar} \times V_2 \Rightarrow V_2 = \frac{2.400 \text{ l} \times 1 \text{ Bar}}{2 \text{ Bar}} = 1200 \text{ l}$$

$$\text{Para } 20 \text{ m} \Rightarrow P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2 \Rightarrow 2.400 \text{ l} \times 1 \text{ Bar} = 3 \text{ Bar} \times V_2 \Rightarrow V_2 = \frac{2.400 \text{ l} \times 1 \text{ Bar}}{3 \text{ Bar}} = 800 \text{ l}$$

$$\text{Para } 30 \text{ m} \Rightarrow P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2 \Rightarrow 2.400 \text{ l} \times 1 \text{ Bar} = 4 \text{ Bar} \times V_2 \Rightarrow V_2 = \frac{2.400 \text{ l} \times 1 \text{ Bar}}{4 \text{ Bar}} = 600 \text{ l}$$

$$\text{Para } 40 \text{ m} \Rightarrow P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2 \Rightarrow 2.400 \text{ l} \times 1 \text{ Bar} = 5 \text{ Bar} \times V_2 \Rightarrow V_2 = \frac{2.400 \text{ l} \times 1 \text{ Bar}}{5 \text{ Bar}} = 480 \text{ l}$$

Llevando a una tabla y comparando se tendrá:

Prof	PAbs	Vol	VARIACIÓN	
- m -	- Bar -	- l -	Fracción	- % -
0	1	2400	1	0
10	2	1200	1/2	50
20	3	800	1/3	33
30	4	600	1/4	25
40	5	480	1/5	20

Tabla 7.b: Variación de la PAbs

Conclusiones:

La fracción representa la cantidad proporcional de aire para cada profundidad referida a la cantidad de gas en superficie. Mientras que el Porcentaje [%] represente la variación del volumen de la masa de aire entre sucesivas de 1 Bar.

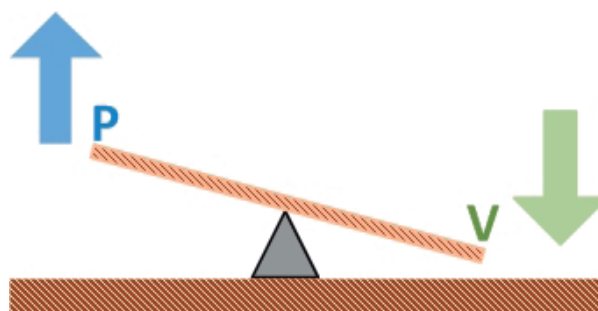


Figura 7.4: Relación entre la Presión [P] y el Volumen [V].

Si se interpreta la Ley de Boyle – Mariotte como el juego infantil del sube y baja, en el cual el Volumen [V] desciende cuando la Presión [P] asciende y, recordando que el volumen del sistema respiratorio se mantiene constante durante una inmersión en la cual se utiliza un equipo autónomo, el volumen de aire respirado se incrementará proporcionalmente al aumento de la profundidad, lo cual es particularmente importante a la hora de calcular el tiempo de fondo en función de la cantidad de aire disponible.

Ejemplo:

Se debe bajar al fondo una campana de buceo abierta que tiene un volumen de 1,5 m³ (53,0 ft³) desde una embarcación. Durante la operación no se suministra, ni se pierde aire de la campana.

Calcular el volumen de aire en la campana a -30 mws (99 fws).

Se aplica la ley del Boyle para encontrar el Volumen Final (V₂):

$$\frac{P_1 \times V_1}{T_1} = \frac{P_2 \times V_2}{T_2} \quad [1]$$

Donde:

P₁ = Presión Inicial [ATA, bar, PSI, etc.].

P₂ = Presión Final [ATA, bar, PSI, etc.].

V₁ = Volumen Inicial [m³, litros, pie³, etc.].

V₂ = Volumen Final [m³, litros, pie³, etc.].

T₁ = Temperatura Absoluta Inicial [K] >> T₁ [K] = T₁ [°C] + 273.

T₂ = Temperatura Absoluta Final [K] >> T₂ [K] = T₂ [°C] + 273.

DATOS DEL PROBLEMA:

- ✓ Volumen Inicial (V₁) = 1,5 m³.
- ✓ Profundidad (D) = -30 mws.

Despejando en [1] V₂, y como se considera T₁ = T₂ = Constante, se simplifican y nos queda:

$$V_2 = \frac{P_1 \times V_1}{P_2}$$

La P₂ a -30 msw es:

$$P \text{ [ATA]} = \frac{D \text{ [mws]}}{10} + 1$$

Donde:

P = Presión [ATA]

D = Profundidad [mws]

$$P_2 = \frac{30 \text{ [mws]}}{10 \text{ [mws/ATA]}} + 1 \text{ [ATA]} = 4 \text{ ATA}$$

Reemplazando en V2

$$V_2 = \frac{1 \text{ (ATA)} \times 1,5 \text{ (m}^3\text{)}}{4 \text{ (ATA)}} = 0,375 \text{ m}^3$$

El volumen de aire en la campana se ha comprimido a 0,375 m³ a -30 msw (99 fws).

Leyes de Charles – Gay Loussac

Jacques Charles (1746 – 1823), físico francés estudió y utilizó el Hidraten [H] para elevar globos aerostáticos. Independientemente de Gay Loussac estudio y enunció una ley sobre la dilatación de los gases contenidos en un volumen constante.

Louis Joseph Gay Loussac (1778 – 1850), físico y químico francés, realizó trabajos sobre las relaciones volumétricas de las masas gaseosas. Estudió la dilatación de las masas gaseosas por calor, en 1816, construyó el barómetro de sifón que lleva su nombre.

Las Leyes de Charles-Guy Loussac, explican las variaciones de Volumen [V] del aire almacenado en un botellón de buceo, respecto de la variación de su Temperatura [T] de, cuando una de ellas se mantiene constante.

La primera Ley de Charles-Guy Loussac, dice:

“A Presión [P] constante, el Volumen [V] de un gas es directamente proporcional a la Temperatura Absoluta [T] que soporta”.

$$\frac{V}{T} = k \quad (\text{a } P = \text{Cte})$$

La segunda Ley de Charles-Guy Loussac, dice:

“A Volumen [V] constante, la Presión [P] de un gas es directamente proporcional a la Temperatura Absoluta [T] que soporta”.

$$\frac{P}{T} = k \quad (\text{a } V = \text{Cte})$$

Las leyes Ley de Charles-Guy Loussac, explican que sucede con el volumen de aire que se manipula cuando alguna de sus variables cambia por alguna causa. Estas causas, pueden ser externas o internas.

Causas internas

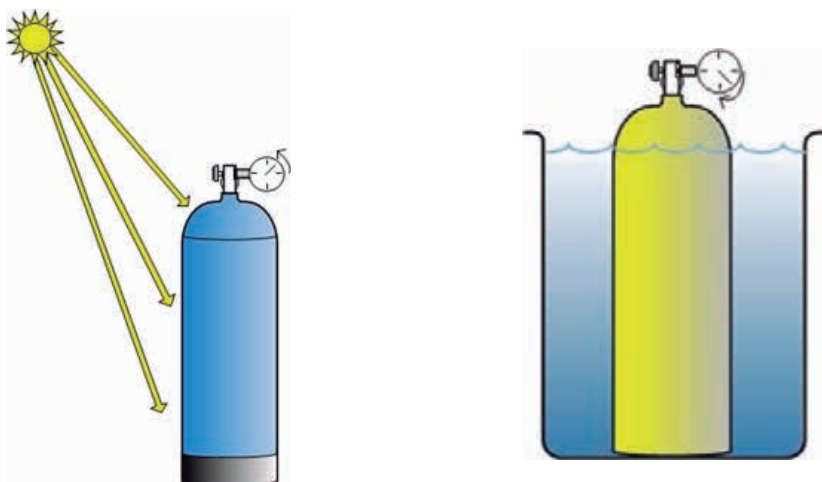


Figura 7.4: Causas Internas

Las causas internas, presentan dos alternativas respecto de la Temperatura, que esta aumente o disminuya.

Cuando la Temperatura aumenta y, puesto que el Volumen no varía, el resultado inmediato se manifiesta en un incremento de la presión interior de cilindro, que puede alcanzar límites peligrosos si la exposición es prologada, llegando a disparar la válvula de seguridad del Robinete. Por lo tanto, una precaución a tomar cuando se almacenan o transportan botellones cargados a su presión de trabajo es resguardarlos de fuentes intensas de calor, como por ejemplo los rayos del sol.

El segundo caso es el inverso, se presenta cuando la temperatura disminuye. Normalmente esto sucede cuando la diferencia de la temperatura ambiente con la del agua es grande, entonces al sumergir el botellón se producirá una caída de su presión interior. Este fenómeno es inevitable y puede ser causa de un accidente por agotamiento temprano del aire, por lo cual cuando se bucea en aguas muy frías, es imprescindible contar con un manómetro sumergible o computadora de buceo, para monitorear constantemente su presión interna.

Causas externas

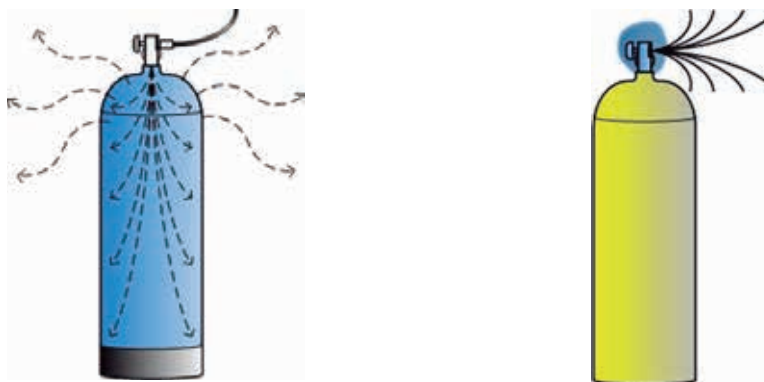


Figura 7.5: Causas externas: Enfriamiento; Calentamiento

En este caso también se presentan las mismas dos alternativas respecto de la Temperatura [T], que esta aumente o disminuya.

La primera, cuando la temperatura se incrementa, se da cuando se recarga el botellón demasiado rápido, esto sucede porque al ingresar el aire al botellón, con una velocidad importante sus moléculas chocan contra la pared interna del cilindro y gran parte de su energía cinética se transforma en energía térmica, elevando su temperatura.

Este efecto se evita, manteniendo la una adecuada velocidad de ingreso y el botellón sumergido en un baño de agua, durante su recarga.

La segunda causa interna se presenta cuando se deja escapar el aire contenido en el botellón. Si se permite que la liberación del aire sea en forma rápida y abrupta, se produce un enfriamiento importante de cuello del cilindro y del Robinete y, se condensa sobre ellos la humedad del aire atmosférico.

Esta acción, enfría también la masa de aire en el interior del Botellón, induciendo a la condensación de la humedad contenida en el mismo, precipitando una cantidad de agua que puede llegar a ser importante, abriendo el camino para la oxidación interior del cilindro, en especial los de aleación de acero. Y reduciendo su volumen interior.

Ejemplos:

1ª Ley de Charles/Gay-Lussac's

Determina la relación entre la Temperatura [T] y el Volumen [V]

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad a \quad P = cte. \quad [1]$$

Donde:

V_1 = Volumen Inicial [m³, litros, pie³, etc.].

V_2 = Volumen Final [m³, litros, pie³, etc.].

T_1 = Temperatura Absoluta Inicial [K] >> T_1 [K]= T_1 [°C]+273

T_2 = Temperatura Absoluta Final [K] >> T_2 [K]= T_2 [°C]+273

Ejemplo:

Continuando con el ejercicio anterior, en el cual se hace descender una campana abierta de 1,5 m³ a -30 msw. Se tiene que la temperatura en superficie es de 27 °C (80 °F), mientras que la temperatura a la profundidad de operación es de 7 °C (45 °F). Aplicar la 1ª Ley de Charles/Gay-Lussac's, para determinar el efecto de la Temperatura.

De la formula [1] se despeja el Volumen Final (V_2)

$$V_2 = \frac{T_2 \times V_1}{T_1} \quad [2]$$

DATOS:

$$V_1 = 1,5 \text{ m}^3$$

$$T_1 = 27 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 7 \text{ }^\circ\text{C}$$

Primero se convierten las Temperaturas en Grados Centígrados [$^\circ\text{C}$] a Temperaturas Absolutas en Grados Kelvin [K]

$$T \text{ (}^\circ\text{K)} = T \text{ (}^\circ\text{C)} + 273$$

$$T_1 \text{ (}^\circ\text{K)} = 27 \text{ (}^\circ\text{C)} + 273 = 300 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$T_2 \text{ (}^\circ\text{K)} = 7 \text{ (}^\circ\text{C)} + 273 = 280 \text{ }^\circ\text{K}$$

Reemplazando en [2]

$$V_2 = \frac{280 \text{ }^\circ\text{K} \times 1,5 \text{ m}^3}{300 \text{ }^\circ\text{K}} = \mathbf{1,4 \text{ m}^3}$$

El volumen de aire a -30 m y 7 $^\circ\text{C}$, será de 1,4 m^3

2ª Ley de Charles/Gay-Lussac's

Determina la relación entre la Presión [P] y el Volumen [V]

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad a \quad V = cte.$$

Donde:

P_1 = Presión Absoluta Inicial [ATA, bar, PSI, etc.].

P_2 = Presión Absoluta Final [ATA, bar, PSI, etc.].

T_1 = Temperatura Absoluta Inicial [K] >> $T_1 \text{ [K]} = T_1 \text{ [}^\circ\text{C]} + 273$.

T_2 = Temperatura Absoluta Final [K] >> $T_2 \text{ [K]} = T_2 \text{ [}^\circ\text{C]} + 273$.

Ejemplo 2

Durante un ensayo de laboratorio, la presión el interior en un canister de 250 cm³ es de 200 bar, medidos con un manómetro digital, mientras que la temperatura del laboratorio es de 22 °C. Un incendio en un espacio contiguo, hace que la temperatura en el laboratorio donde se encuentra el canister alcance los 77 °C. ¿Qué pasará con la presión en el matraz?

DATOS

P_1 = Presión Inicial: 200 bar.

T_1 = Temperatura Inicial: 22 °C.

T_2 = Temperatura Final: 77 °C

De la formula de la Segunda Ley de Charles – Gay Loussac se despeja la Presión Final

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \gg \gg P_2 = \frac{P_1 \times T_2}{T_1} \quad [1]$$

Primero se convierte la Presión Inicial a Presión Inicial Absoluta [P_1]

$$P_{Abs} = P_{Man} + P_{Atm}$$

$$P_1 = 200 \text{ bar} + 1 \text{ bar} = \mathbf{201 \text{ bar}}$$

Luego se calculan las Temperaturas Inicial y Final Absolutas

$$T (K) = T (^\circ C) + 273$$

$$T_1 (K) = 22 (^\circ C) + 273 = \mathbf{295 \text{ K}}$$

$$T_2 (K) = 77 (^\circ C) + 273 = \mathbf{350 \text{ K}}$$

Reemplazando los valores en [1]

$$P_2 = \frac{P_1 \times T_2}{T_1} = \frac{201 \text{ bar} \times 350 \text{ K}}{295 \text{ K}} = 238,47 \text{ bar} \cong \mathbf{239 \text{ bar}}$$

Convirtiendo la Presión Absoluta en Presión Manométrica

$$P_{Abs} = P_{Man} + P_{Atm} \gggg P_{Man} = P_{Abs} - P_{Atm}$$

$$P_{Man} = P_{Abs} - P_{Atm} = 239 \text{ bar} - 1 \text{ bar} = \mathbf{238 \text{ bar}}$$

La presión en el canister aumentó de 200 bar a 238 bar. Nótese que la presión aumentó a pesar de que el volumen del canister y el volumen del gas permanecieron iguales.

Este ejemplo también muestra que le sucedería a un cilindro de buceo que se carga a su capacidad máxima de trabajo y se deja en el baúl de un automóvil o expuesto a la luz solar directa en un día caluroso.

Ley general de estado de los gases ideales

Las experiencias han demostrado, que el producto de la presión por el volumen de la ecuación de Boyle, no se mantiene exactamente constantes en gases diferentes, para una temperatura y presión establecida. Por ello es importante definir una sustancia imaginaria llamada Gas Perfecto el cual por definición sigue exactamente las leyes de Boyle - Mariotte y Charles - Gay Lussac

Ahora nos hallamos en condiciones de combinar las ecuaciones de Boyle - Mariotte y las de Charles - Gay Lussac, para obtener en una sola ecuación que relacione las tres variables (Presión [P], Volumen [V] y Temperatura [T]) en una sola ecuación que defina un gas perfecto, de este modo se obtiene la llamada Ecuación General de Estado de los Gases Perfectos. Esta es:

$$\frac{P_1 \times V_1}{T_1} = \frac{P_2 \times V_2}{T_2} = k \quad (1)$$

de (1):

$$P \times V = kT \quad (2)$$

Se ha demostrado que la constante k es igual a, el número de moles (n), multiplicado por la Constante Universal de los Gases Perfectos (R), reemplazando en (2) se tiene

$$P \times V = nRT$$

donde:

$P =$ Presión Absoluta [Atm]

$V =$ Volumen [l]

$T =$ Temperatura Absoluta [$^{\circ}K = ^{\circ}C + 273$]

$n =$ moles gramo [mol]

$R = 0,08207 \frac{l \times at}{mol \times ^{\circ}K}$

Antes de plantear un ejemplo práctico, es importante remarcar que, para aplicar la Ecuación General de Estado de los Gases Perfectos, los valores de Presión [P] y Temperatura [T] deben estar expresados en Valores Absolutos.

Ejercicio 1:

Sabiendo que el Peso Molecular [M] del Oxígeno [O₂] es de 32 g/mol. Cuántos kilogramos de dicho gas se hayan en la botella de un equipo de circuito cerrado, cuyo volumen es de 1,5 litros cuando que está sometido a una presión manométrica de 200 at y a una temperatura de 27°C. Supóngase que se cumplen las leyes de los gases perfectos.

El peso de la masa de Oxígeno [O₂] contenida en el botellón, es igual a el número de moles presentes (n) multiplicado por el Peso Molecular del gas.

$$W = n \times M \quad (1)$$

Por lo tanto, tenemos la Ecuación General de Estado de los Gases Perfectos y despejemos n:

$$P \times V = n R T$$

De donde:

$$n = \frac{P \times V}{R \times T} \quad (2)$$

Reemplazando (2) en (1)

$$W = \frac{P \times V}{R \times T} \times M$$

Calculamos ahora los Valores Absolutos de la Presión [P] y la Temperatura [T]

$$P_{Abs} = P_{Mano}[At] + 1At = 200At + 1At = 201At$$

$$T [K] = t [^\circ C] + 273 = 27^\circ C + 273 = 300 K$$

Reemplazando:

$$W = \frac{P \times V}{R \times T} \times M = \frac{201At \times 1,5l}{0,08207 \frac{l \times At}{mol \times K} \times 300 K} \times 32 \frac{g}{mol} = 391,86g$$

Ejercicio 2:

Que volumen ocupará el Oxígeno [O₂], si se le permite dilatarse hasta la Presión Atmosférica a la temperatura de 50 °C

Como se tiene siempre la misma masa de gas podemos decir que:

$$\frac{P_1 \times V_1}{T_1} = \frac{P_2 \times V_2}{T_2}$$

Despejando V₂, y ordenando, se tiene:

$$V_2 = V_1 \times \frac{P_1 \times T_2}{P_2 \times T_1}$$

Calculando T₂ absoluta y reemplazando valores se tiene:

$$V_2 = 1,5l \times \frac{201At \times 325^{\circ}K}{1At \times 300^{\circ}K} = 324,62 l$$

Ejercicio N° 3

Supongamos que se tiene un botellón de Aluminio de 80 ft³ (2265 l), al cual se lo carga a una Presión de Carga (PrC) igual a 200 Bar. Se lo almacena a la espera de ser utilizado en un pañol, cuya Temperatura Ambiente (TAmb) igual a 25 °C. Una vez retirado se lo transporte a la playa, donde el cilindro alcanza una temperatura (Temperatura al Sol (TSol)) igual a 70 °C. Se pregunta:

¿Cuál es la Presión Final (que llamaremos TSol)?

¿Que consecuencias tiene sobre el material el sobrecalentamiento?

Datos:

Botellón: Aluminio (Al) – 80 ft³= 2265 l

Presión Carga (PrC)= 200 Bar

Temperatura Ambiente (TAmb)= 25 °C

Temperatura al Sol (TSol)= 70 °C

Respuesta N° 1

Para solucionar el problema se debe aplicar la Ley General de Estado de los Gases Ideales, la cual es:

$$PV = nRT$$

Donde:

P= Presión Absoluta (PAb) [At; Bar]

V= Volumen [l]

n= moles del gas

R= Contante Universal de los Gases Ideales $(0,082 \frac{At \times l}{mol K})$

T= Temperatura Absoluta [K]. Relación: $T[K] = T[°C] + 273,15$

Como el Volumen es constante por estar contenido el gas (aire, Nitrox; Helio; etc.) en un recipiente indeformable como es un botellón de buceo, se despeja el Volumen (V) de la formula. Entonces se tiene:

$$V = nR \frac{T}{P}$$

Al ser los volúmenes iguales en ambos estados (pre y post sobrecalentamiento), se puede igualar los mismos:

$$V_{Sol} = V_{Amb}$$

$$nR \frac{T_{Sol}}{P_{Sol}} = nR \frac{T_{Amb}}{P_{Amb}}$$

Simplificando nR y despejando P_{Sol}

$$P_{Sol} = P_{Amb} \frac{T_{Sol}}{T_{Amb}}$$

Con lo cual se deduce que todo aumento de la Presión Interior es proporcional al aumento de su temperatura.

Antes de aplicar la fórmula, se debe transformar las Temperaturas en Grados Celsius [°C] a Temperaturas Absolutas [K], la relación es:

$$T[°K] = T[°C] + 273,15$$

Temperatura Ambiente (T_{Amb})= 25 °C

$$T_{Abs}(25^{\circ}C) = 25^{\circ}C + 273,15 = 298,15 K \cong 300 K$$

Temperatura al Sol (T_{Sol})= 75 °C

$$T_{Abs}(70^{\circ}C) = 70^{\circ}C + 273,15 = 343,15 K \cong 345 K$$

Entonces:

$$P_{Sol} = P_{Am} \times \frac{T_{Abs}(75 K)}{T_{Abs}(25 K)}$$

Reemplazando:

$$P_{Sol} = 200Bar \times \frac{345 K}{300 K} = 230Bar$$

Respuesta N° 2

Comparando la Presión de Carga del botellón; que es de 200 Bar, con la Presión de exposición al rayo del sol que por cálculo es 230 Bar, se ve que esta no supera Presión de Trabajo que es de 232 Bar (23200 KPascal) según el fabricante

Además, comparando la Presión de exposición al rayo del sol que por cálculo es 230 Bar, con la Presión de Prueba que es de 348 Bar (34800 KPascal), se aprecia que la primera es inferior. Se puede concluir que la sobrepresión a que fue sometido nuestro botellón, no alcanza el límite elástico del material, luego del cual se producen deformaciones permanentes, por lo cual no existirá fatiga del mismo.

Ejercicio 3

Se va a realizar una operación para rescatar una embarcación hundida a -40 m de profundidad. Se planea una inmersión exploratoria, utilizando equipo de buceo autónomo, para inspeccionar los restos. Los cilindros de buceo autónomo están cargados a 225 ATA, lo que eleva la temperatura en los tanques a 60 °C. Por experiencia en estas aguas, se sabe que la temperatura a la profundidad operativa será de aproximadamente 4 °C. Calcular cuál será la lectura del manómetro cuando llegue por primera vez al fondo. (Suponga que no hay pérdida de aire debido a la respiración).

DATOS:

P_1 = Presión Inicial= 225 ATA.

T_1 = Temperatura Inicial = 60 °C.

$T_2 =$ Temperatura Final = 4 °C.

Como el volumen de los botellones no cambiará, se pueden simplificar V_1 y V_2 de la fórmula [1], quedando:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad [2]$$

Despejando en [2] la Presión Final [P_2]

$$P_2 = \frac{P_1 \times T_2}{T_1} \quad [3]$$

Donde:

$P_1 =$ Presión Absoluta Inicial [ATA].

$P_2 =$ Presión Absoluta Final [ATA].

$T_1 =$ Temperatura Absoluta Inicial [K] $\gg T_1$ [K] = T_1 [°C] + 273.

$T_2 =$ Temperatura Absoluta Final [K] $\gg T_2$ [K] = T_2 [°C] + 273.

Se convierte la Presión Inicial en absoluta:

$$P_{Abs} = P_{Man} + P_{Atm}$$

$$P_1 = 225 \text{ ATA} + 1 \text{ ATA} = \mathbf{226 \text{ ATA}}$$

Se convierten las Temperaturas en Grados Centígrados [°C] a Temperaturas Absolutas en Grados Kelvin [°K]

$$T (K) = T (°C) + 273$$

$$T_1 = 60 \text{ °C} + 273 = \mathbf{333 \text{ K}}$$

$$T_2 = 4 \text{ °C} + 273 = \mathbf{277 \text{ K}}$$

Reemplazando en [3]

$$P_2 = \frac{P_1 \times T_2}{T_1} = \frac{226 \text{ ATA} \times 277 \text{ °K}}{333 \text{ K}} = 187,99 \text{ ATA} \cong \mathbf{188 \text{ ATA}}$$

Por lo tanto, a -40 m y 7 °C de temperatura los buzos dispondrán de menos aire que cuando los botellones se hallaban en superficie.

Ejercicio 4

Durante la inmersión de reconocimiento para la operación del Ejemplo 1, los buzos determinaron que el daño requerirá un parche. El supervisor de buceo elige utilizar un equipo que provea aire desde la superficie. El caudal del compresor es de 2.000 l/min, la temperatura de salida del aire en la cubierta del barco es de 27 °C. Determinar si el compresor puede suministrar el volumen de aire adecuado tanto al buzo que trabaja como al buzo de reserva a la profundidad y temperatura operativas.

DATOS:

D= Profundidad= -40 m

P_1 = Presión Inicial= 225 ATA.

T_1 = Temperatura Inicial = 60 °C.

T_2 = Temperatura Final= 4 °C.

De la fórmula de la Ley General de los Gases Ideales,

$$\frac{P_1 \times V_1}{T_1} = \frac{P_2 \times V_2}{T_2}$$

se despeja el Volumen Final [V_2]

$$V_2 = \frac{P_1 \times V_1 \times T_2}{T_1 \times P_2} \quad [1]$$

Se calcula la Presión Absoluta a -40 m

$$P_1 [ATA] = \frac{D [m]}{10 [m/ATA]} + 1 = \frac{40 m}{10 m/ATA} + 1 = 5 ATA$$

Se convierten las Temperaturas en Grados Centígrados [°C] a Temperaturas Absolutas en Grados Kelvin [°K]

$$T (K) = T (°C) + 273$$

$$T_1 = 60 °C + 273 = 333 K$$

$$T_2 = 4 °C + 273 = 277 K$$

Reemplazando en [1]

$$V_2 = \frac{P_1 \times V_1 \times T_2}{T_1 \times P_2} = \frac{1 \text{ ATA} \times 2.000 \frac{\text{l}}{\text{min}} \times 277 \text{ }^\circ\text{K}}{5 \text{ ATA} \times 333 \text{ }^\circ\text{K}} = 332,73 \frac{\text{l}}{\text{min}} \cong 333 \text{ l/min}$$

El compresor entregará aproximadamente 333 l/min a la Presión y Temperatura del fondo.

Asumiendo que un buzo realizando un Esfuerzo Mediano requerirá de un VRM (Volumen Respiratorio por Minuto) de 40 l/min, se tendrá que los dos buzos a -40 m, consumirán:

$$RVM_{Total} = 40 \frac{\text{l}}{\text{min} \times \text{ATA}} \times 5 \text{ ATA} \times 2 \text{ Buzos} = 200 \text{ l/min}$$

Por lo tanto, la capacidad del compresor es suficiente para soportar a los dos buzos de trabajo.

Ejercicio 5

Calcular cantidad real de aire que contiene un cilindro con un volumen interno de 12 litros cargado a 200 bar.

DATOS:

P_1 = Presión Inicial: 1 bar.

P_2 = Presión Final: 200 bar

V_2 = Volumen Final: 12 litros

Como la temperatura del botellón no cambiará, entonces T_1 y T_2 se pueden eliminar de la fórmula de la Ley.

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2 \quad [1]$$

Despejando V_1 en [1]

$$V_1 = \frac{P_2 \times V_2}{P_1} \quad [2]$$

Donde:

P_1 = Presión Inicial.

P_2 = Presión Absoluta Final

V_2 = Volumen Final

Se convierte la Presión Final en Presión Final Absoluta [P_2]:

$$P_{Abs} = P_{Man} + P_{Atm}$$

$$P_2 = 200 \text{ bar} + 1 \text{ bar} = 201 \text{ bar}$$

Reemplazando en [1], los valores:

$$V_1 = \frac{P_2 \times V_2}{P_1} = \frac{201 \text{ bar} \times 12 \text{ l}}{1 \text{ bar}} = 2.412 \text{ l}$$

Ley de Dalton: de las presiones parciales

La Ley de las Presiones Parciales, la descubrió en naturalista inglés John Dalton (1766-1844) y se la conoce también por su nombre. Esta dice:

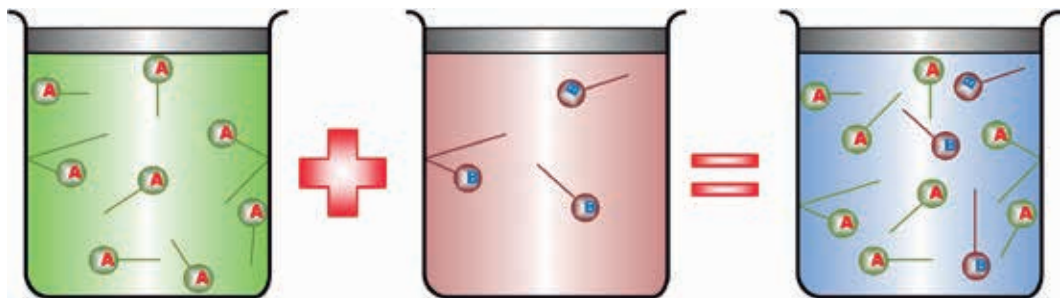


Figura 7.6: Ley de Dalton

“La Presión Total [PT] ejercida por una mezcla gaseosa, es igual a la suma de las Presiones Parciales [Pp] de los gases que la componen”

$$PT = \sum_1^n PpX = PpA + PpB + \dots + PpN$$

COMPOSICIÓN DEL AIRE SECO		PROP	PpX _{NM,n}	SIMPLIF	PpX _{NM,n}	
		%	Bar	%	Bar	
Oxígeno	O ₂	20,946	0,20946	21,00	0,21	
Nitrógeno	N ₂	78,084	0,7808	79,00	0,79	
Dióxido de Carbono	CO ₂	0,033	0,0033			
Gases Raros	Argón	Ar	0,934			0,0934
	Neón	Ne	0,003			0,0003
	Helio	He				
	Criptón	Kr				
	Hidrógeno	H ₂				
	Xenón	Xe				
	Radón	Ra				
	Monóxido de Carbono	CO				
Presión Total _{aire}		100,00		1 Bar	100,00	

Tabla 7.c: Presiones Parciales a Nivel del Mar

Se entiende por Presión Parcial [PpX], a la presión que cada gas ejercer si ocupase solo todo el volumen que ocupa la mezcla. Por lo tanto:

$$PpX = \%G \times P_T$$

Donde:

PpX= Presión Parcial [AtA]

%G= Porcentaje de gas en la Mezcla

P_T= Presión Total [AtA]

Como se desarrolló en la Unidad 3 – La Atmosfera, en el párrafo correspondiente al Aire, este es una mezcla gaseosa con la composición que muestra la Tabla 7.c. Aplicando la Ley de Dalton para el aire a diferentes Profundidades [P], se obtiene la Tabla 7.d:

$$P_{Taire} = PpO_2 + PpN_2 + PpCO_2 + PpGR$$

Presión parcial crítica

PROF	PRESIÓN ABSOLUTA	PRESIÓN PARCIAL		
		78% N ₂	21% O ₂	1% Otros
m	Bar	Bar	Bar	Bar
0	1,00	0.78	0.21	0.01
10	2,00	1.56	0.42	0.02
20	3,00	2.34	0.63	0.03
30	4,00	3.12	0.84	0.04
40	5,00	3.90	1.05	0.05

Tabla 7.d: Presiones Parciales.

En la Tabla 7.d, se puede apreciar claramente como varía la Presión Parcial de los diferentes gases que componen el aire atmosférico, en función de la Profundidad [P]. Ahora bien, cuando las Presiones Parciales del Oxígeno (PpO₂), Nitrógeno (PpN₂), Dióxido de Carbono (PpCO₂) y Monóxido de Carbono (PpCO), alcanzan ciertos valores, comienzan a tener efectos tóxicos sobre el organismo. A esta Presión Parcial se la llama Presión Parcial Crítica (PpcX) y se define como:

GASES		Ppc -Bar-
Nitrógeno	N ₂	4,000
Oxígeno	O ₂	1,60
Dióxido de Carbono	CO ₂	0,05
Monóxido de Carbono	CO	0,0005

Tabla 7.e: Presiones Parciales Críticas

“Parcial Crítica [PpcX] es aquella en la cual los gases comienzan a tener efectos nocivos sobre el organismo”

Ejercicio 1:

Sabiendo que la Presión Parcial Crítica del Oxígeno [PpcO₂] es 1,6 AtA. A que profundidad máxima se podrá bucear con una mezcla Nitrox 50/50.

De la fórmula de la presión parcial:

$$PpX = \%G \times P_T \Rightarrow P_T = \frac{PpX}{\%G} \quad (1)$$

reemplazando en (1)

$$P_T = \frac{1,6Bar}{0,5} = 3,2Bar \quad (2)$$

Como la Presión Total (PT), es para nuestro caso la Presión Absoluta [PAbs] y, recordando que:

$$Prof [m] = (PAbs[Bar] - 1) \times 10 \Rightarrow Prof [m] = [3,2Bar - 1] \times 10 = 22m$$

Conclusiones:

Con una mezcla Nitrox 50/50 de la profundidad límite permitido para una inversión será de 22 metros. Superada esta el Oxígeno [O₂] comenzara a tener efectos nocivos para el organismo.

Ejercicio 2

Calcular la Presión Parcial de Oxígeno [O₂] en el aire a -58 msw

DATOS:

D: Profundidad: -58 mw.

%O₂: 21 % en el Aire.

$$PpO_2 = \%O_2 \times P_{Abs} \quad [1]$$

Para poder operar matemáticamente, se convierte el Porcentaje de Gas [%Gas] a la Expresión Matemática de un gas determinado [EMX] :

$$EMO_2 = \frac{\%O_2}{100} = \frac{21 \%}{100} = 0,21$$

Se calcula la Presión Absoluta a -58 msw

$$P_{Abs} = \frac{D}{10} + 1 = \frac{58 \text{ msw}}{10 \text{ m/ATA}} + 1 \text{ ATA} = \mathbf{6,8 \text{ ATA}}$$

Reemplazando en [1]

$$PpO_2 = \%O_2 \times P_{Abs} = 0,21 \times 6,8 \text{ ATA} = \mathbf{1,43 \text{ ATA}}$$

La Presión Parcial del Oxígeno [O₂] a -58 m es de 1,43 ATA.

Ejercicio 3

En el buceo existe la opción de utilizar diferentes mezclas Binarias y Ternarias de gases distintas del aire. Sin embargo, se debe controlar la cantidad de Oxígeno [O₂] en dichas mezclas para evitar exponer a los buzos a los efectos nocivos derivados del aumento de la Presión Parcial del Oxígeno [PpO₂]. Determinar el porcentaje máximo de Oxígeno [O₂] permitido al bucear a -90 msw, considerando un Límite Seguridad de 1,3 ATA de Presión Parcial del Oxígeno [PpO₂].

DATOS:

D: Profundidad: -90 msw.

PpO₂: 1,3 ATA.

La Ley de Dalton expresa:

$$PpO_2 = \%O_2 \times P_{Abs} \quad [1]$$

De [1] se despeja el %O₂

$$EMO_2 = \frac{PpO_2}{P_{Abs}} \quad [2]$$

Se Calcula la Presión Absoluta a -90 msw:

$$P_{Abs} = \frac{D}{10} + 1 = \frac{90 \text{ msw}}{10 \text{ m/ATA}} + 1 \text{ ATA} = \mathbf{10 \text{ ATA}}$$

Reemplazando en [2]

$$EMO_2 = \frac{PpO_2}{P_{Abs}} = \frac{1,3 \text{ ATA}}{10 \text{ ATA}} = \mathbf{0,13 \text{ de } O_2}$$

Convirtiendo EMO_2 a Porcentaje:

$$\%O_2 = EMO_2 \times 100\% = 1,3 \times 100\% = \mathbf{13\%}$$

Para no violar el Límite de Seguridad de 1,3 ATA, la cantidad de Oxígeno [O_2], no debe superar el 13%

Ejercicio 4

En el buceo existe la opción de utilizar mezclas Binarias de gases como el HELIOX [Helio (He) y Oxígeno (O_2)]. Determinar la Profundidad Máxima [DMax] segura de una mezcla HELIOX [HeO_2] al 11%, considerando un límite seguridad de 1,3 ATA de Presión Parcial del Oxígeno [PpO_2].

DATOS:

$\%O_2$: 11%

PpO_2 : 1,3 ATA

La Ley de Dalton expresa:

$$PpO_2 = \%O_2 \times P_{Abs} \quad [1]$$

Sabemos que a partir de la Presión Absoluta [$PAbs$] es posible calcular la Profundidad [D] solicitada, entonces de [1] se despeja la Presión Absoluta [$PAbs$]:

$$P_{Abs} = \frac{PpO_2}{\%O_2} \quad [2]$$

Se convierte el Porcentaje de Oxígeno (O_2) a una Expresión Matemática [EM]

$$EMO_2 = \frac{\%O_2}{100} = \frac{11\%}{100} = \mathbf{0,11}$$

Reemplazando en [2]

$$P_{Abs} = \frac{PpO_2}{EMO_2} = \frac{1,3 \text{ ATA}}{0,11} = \mathbf{11,82 \text{ ATA}}$$

Convirtiendo Presión Absoluta [PAbs] en Profundidad [D]

$$P_{Abs} = \frac{D}{10} + 1 \gggg D [m] = [P_{Abs} \times 10] - 1$$

$$D = [11,82 \text{ ATA} \times 10m/ATA] - 1m = 117,2 m \cong \mathbf{117 m}$$

Al considerarse 11% Oxígeno (O_2) en la mezcla y un límite seguridad de 1,3 ATA de PpO_2 , no se deben superar los 117 m.

Soluciones

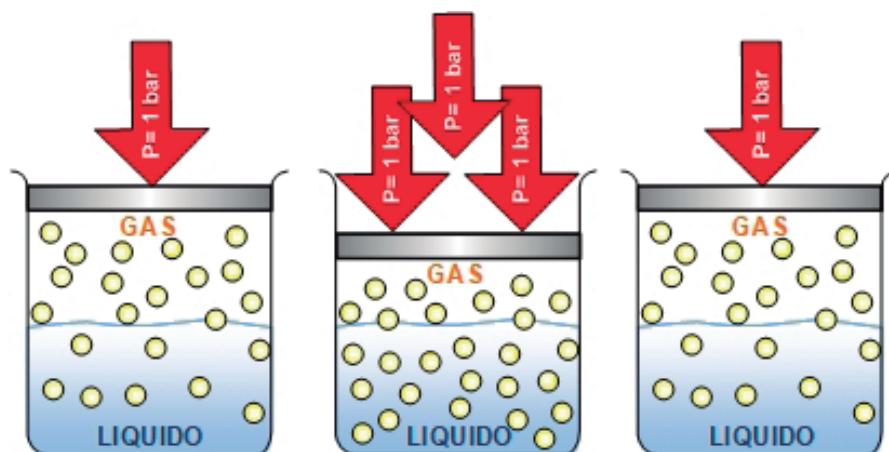


FIGURA 7.7: Solubilidad de un gas un líquido

Se llama solución, a las mezclas homogéneas de dos o más componentes, o dicho de otro modo una solución es una mezcla íntima entre dos o más sustancias.

Si se pone en contacto un Solvente (líquido) y un soluto (gas), este último tenderá a disolverse en el líquido hasta alcanzar cierto equilibrio, una vez obtenido dicho equilibrio, permanecerá constante en el tiempo, mientras la Presión [P] y la Temperatura [T] se mantengan constantes.

Si se incrementa la Presión [P] y, se mantiene la Temperatura [T] constante, mayor cantidad de moléculas de gas se disolverán en el líquido, hasta llegar a un nuevo equilibrio. Este fenómeno lo explica la ley de Henry, la cual se enuncia a continuación

Ley de Henry - Solubilidad y saturación

El concepto de Solubilidad es uno de los más importantes en el buceo.

Se llama Solubilidad [S], a la cantidad de Solute (en nuestro caso el Nitrógeno [N_2] o gas inerte en la mezcla), que se disuelve en un Solvente (Sangre, tejidos y demás fluidos del cuerpo).

Según la Ley de Henry:

“La cantidad de soluto (gas) que se disuelve en un volumen determinado de un solvente (líquido) a temperatura constante, es directamente proporcional a la Presión Parcial [PpG] que ejerce el gas”.

Enunciada de otro modo:

“La Solubilidad [S] es proporcional a la Presión Parcial [PpG] del gas”.

$$S = k \times PpG$$

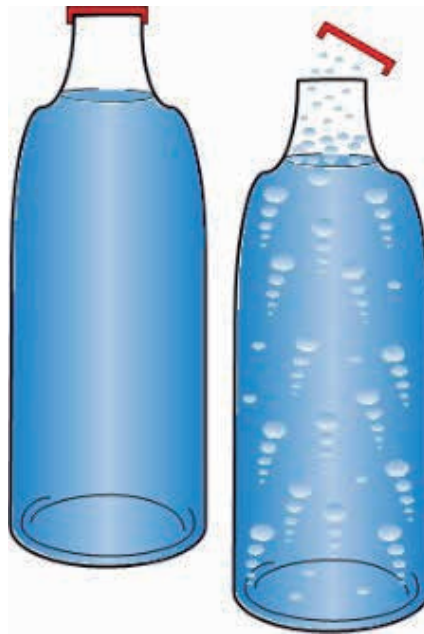


FIGURA 7.8: Liberación de burbujas para compensar el estado de sobresaturación.

Donde la constante k o constante de Henry, es característica de cada gas y cada solvente y PpG es la Presión Parcial del gas.

Según sea la cantidad o volumen de soluto disuelto se reconocen tres estados de saturación:

- ✓ Estado no saturado: es aquel donde el solvente (líquido), puede continuar disolviendo soluto (gas).
- ✓ Estado saturado: o de equilibrio, a aquel en que la cantidad de soluto (gas). disuelto es proporcional a su presión parcial y el volumen disuelto permanecerá constante, mientras la presión y/o temperatura no varíen.
- ✓ Estado sobresaturado: es aquel donde el solvente (líquido) contiene más soluto (gas) que el que puede disolver.

El ejemplo típico de los estados antes mencionados es, el de las bebidas gaseosas. Mientras se hallan tapadas mantienen un volumen determinado de gas disuelto en el líquido. El equilibrio de la solución se mantiene merced a la existencia de una presión superior a la presión atmosférica en el interior del envase.

Al destaparse el envase, las presiones interna y externa tienden a igualarse bruscamente y por lo tanto se rompe el equilibrio soluto / solvente (gas / líquido) quedando el sistema en un estado de sobresaturación, es decir en desequilibrio. El sistema solvente / soluto, tiende entonces hacia un nuevo equilibrio liberando el gas en exceso en forma de burbujas.

La Ley de Henry se cumple tanto para un gas que en forma aislada se pone en contacto con un solvente, como para una mezcla gaseosa, por ejemplo, el aire.

Esta explica el mecanismo de Absorción y Liberación de gases por parte del organismo, el cual juega un papel relevante en el desarrollo del accidente por descompresión.

Para ejemplificar esto último, imaginemos que dos líquidos A y B, que poseen diferentes coeficientes de solubilidad (k), se ponen en contacto con diez moléculas de Nitrógeno (N_2) por unidad de volumen a presión atmosférica. Si el líquido A posee un mayor coeficiente de disolución que el líquido B, se disolverán más cantidad de molécula de Nitrógeno (N_2) por unidad de volumen en el primero, que el segundo. Repitiendo el experimento con los mismos líquidos, pero ahora utilizando Oxígeno (O_2), se verá que este alcanza un equilibrio diferente al Nitrógeno (N_2). Este experimento, demuestra que un determinado solvente, tiene diferentes coeficientes de solubilidad [k] para distintos gases.

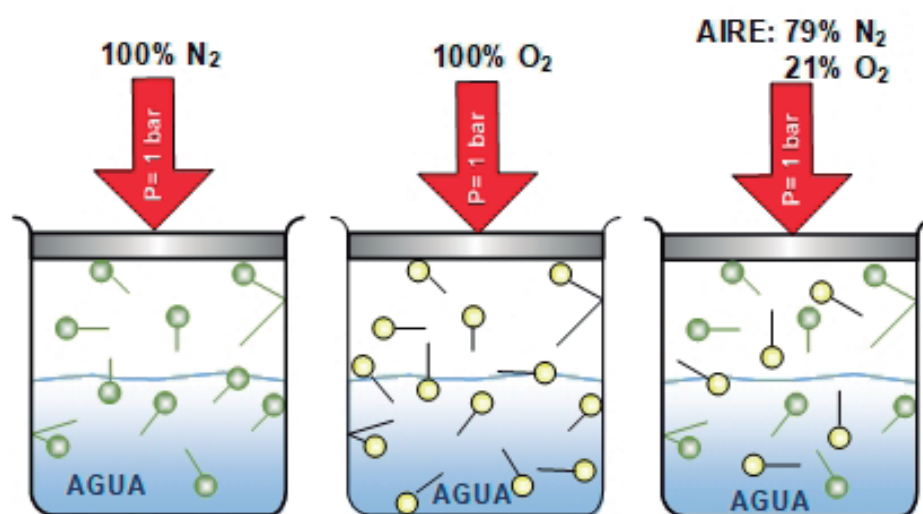


FIGURA 7.9: Disolución de gases diferentes, en un mismo líquido.

Otro experimento es, si realiza una mezcla de gases que contenga, Oxígeno (O_2) y Nitrógeno (N_2) y se pone en contacto con un solvente determinado, se comprobará que se disolverán diferentes cantidades de moléculas de cada gas, en el mismo.

Así, si se imagina un modelo de experimentación donde el agua es el solvente y se pone en contacto con una cantidad conocida de Nitrógeno (N_2), compuesta por 20 moléculas por unidad de volumen se verá que luego de un tiempo, se disolverán 5 moléculas del gas en el agua.

Si el tiempo es el suficiente, se verá que se alcanza el equilibrio, entre la cantidad disuelta y la libre. Además, se comprobará que esta cantidad permanece constante siempre que no se altere la Presión [P] y la Temperatura [T].

Si se repite el experimento, colocando ahora en contacto con el agua 20 moléculas de oxígeno [O₂] en idénticas condiciones que el Nitrógeno [N₂] se verá que una cantidad diferente de estas se disolverá en el solvente, por ejemplo 10 moléculas.

Si ahora se pone en contacto con agua un volumen de 100 moléculas de aire. Este contendrá un 79 % de Nitrógeno [N₂], es decir 79 moléculas y, un 21% de oxígeno [O₂], por lo que se tendrán 21 moléculas de este.

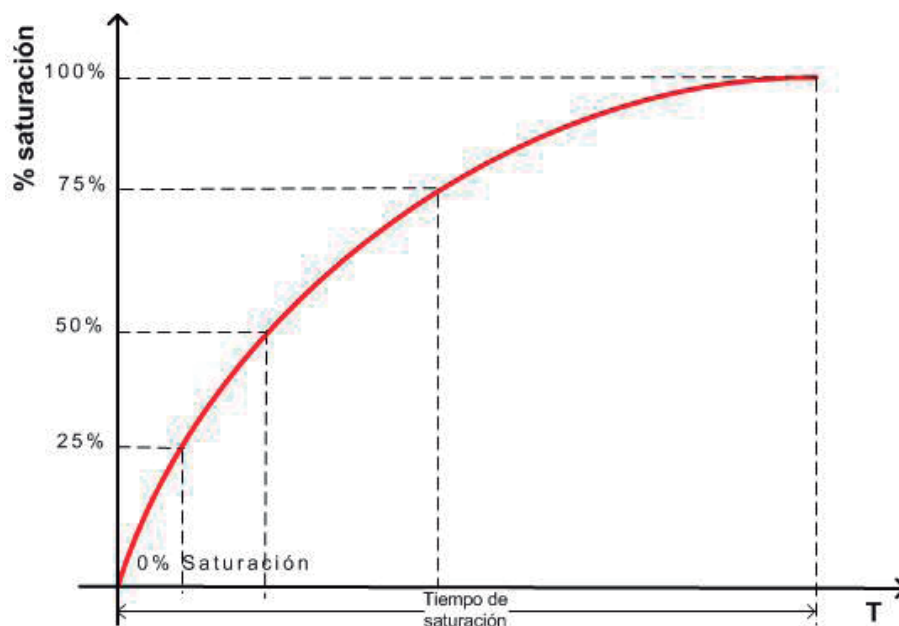


FIGURA 7.10: Curva típica de saturación de un gas en un líquido

Se verá que, si en el primer modelo se puso en contacto un 100% de Nitrógeno [N₂] se disolvieron 5 moléculas, ahora con un 79 % de este se disolverá una cantidad proporcional es decir 4 moléculas. Como es de esperar, algo similar sucede con el Oxígeno [O₂], del cual se disolverán 2 moléculas.

Puestos en contacto un solvente (líquido, tejido, etc.) y un soluto (gas), el punto de saturación no se alcanza en forma instantánea, sino que pasa un cierto tiempo para que se llegue al equilibrio.

Si se representa en el eje de las abscisas (eje X) el porcentaje de gas disuelto (% saturación) y en el de ordenadas (eje Y) Tiempo [T], se obtendrá la curva de la Figura 7.10.

Interpretando el gráfico de la Figura 7.10, se ve que, en un lapso pequeño de tiempo se disuelve cierto porcentaje de gas, por ejemplo, un 25%, para que otro 25% se disuelva pasará un tiempo mayor y para alcanzar el 75% el tiempo será mucho mayor. Esta es una curva del tipo exponencial, cuya expresión matemática es:

$$y = A \times (1 - e^{-kt})$$

Donde:

y = es la cantidad de gas que se disuelve.

A = representa la cantidad de gas disuelto inicialmente.

e = base de los logaritmos naturales.

k = constante, para cada grupo soluto / solvente.

t = Período de tiempo considerado.

Una vez que se alcanzó el punto de equilibrio (saturación), se extrae el gas remanente en el recipiente, el líquido se encontrará ahora en estado de sobresaturación, similar al ejemplo de la botella de soda, comenzará a pasar parte del gas disuelto hacia el espacio vacío, para restablecer el estado de equilibrio.

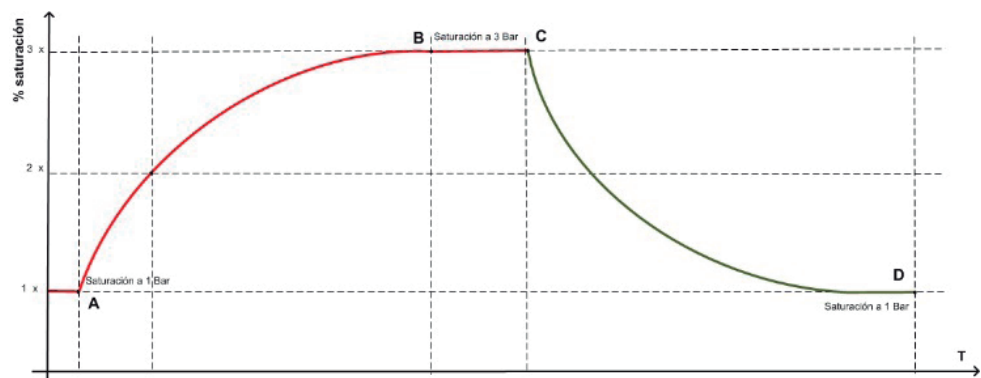


FIGURA 7.11: Curva de saturación y desaturación

Si se gráfica como migra el gas se encontrará que se obtiene una curva exponencial igual a la de la saturación, pero de forma inversa.

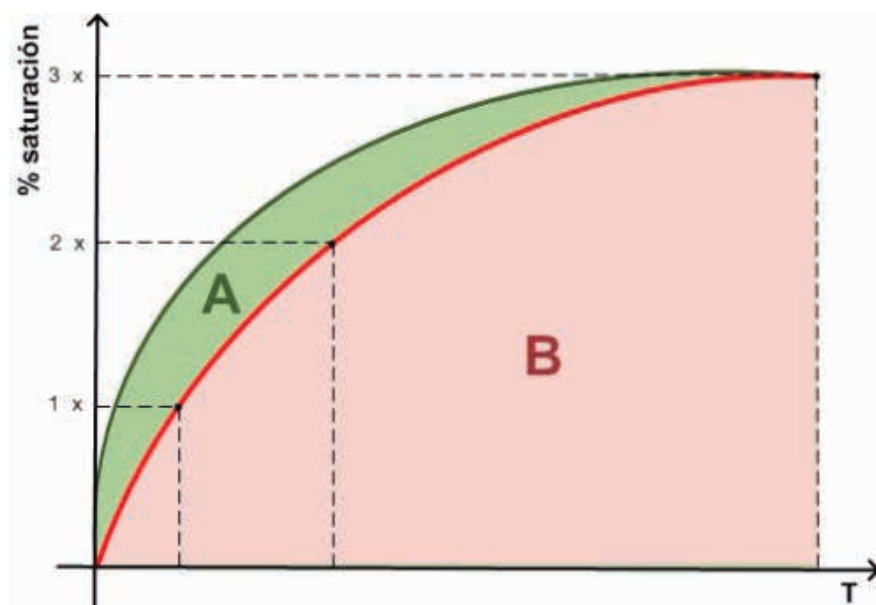


FIGURA 7.12: Curvas de saturación para diferentes líquidos y mismo gas

No existe una sola curva exponencial de saturación y desaturación, si no por el contrario, cada sistema soluto/solvente tendrá su propia curva, como se ve en la Figura 7.12.

Esto quiere decir que cada tejido del cuerpo humano puesto en contacto con Nitrógeno (N_2), dará como resultado una curva de saturación diferente, característica del mismo.

La forma de la curva exponencial no solo depende de las características de cada componente del sistema soluto/solvente, sino que también intervienen factores externos a ellos, como son la Presión [P] y la Temperatura [T].

■ Saturación y desaturación de los tejidos

Las Leyes de los Gases, y los fenómenos de la saturación (Absorción y Liberación de los gases), brindan el marco teórico para entender la etiología de la Enfermedad de la Descompresión, y la base para el enfoque de modelos matemáticos de saturación que ayuden a su prevención.

Como se ha explicado precedentemente un gas inerte, no participa en los procesos metabólicos, se puede decir que solo actúa como vehículo del Oxígeno [O_2] en el proceso de la respiración, ingresando y siendo exhalado a través del sistema respiratorio sin combinarse, hecho este que los convierte el agente de este accidente.

Un gas inerte, se disuelve en los sustratos corporales formando una solución el volumen de gas disuelto está en proporción directa a la presión absoluta a que se halla sometido a las características de solubilidad de cada tejido y a la red vascular que irriga cada tejido.

Absorción y liberación de gas

El cuerpo humano se halla constituido por tejidos, estos a su vez están formados por compartimientos microscópicos llamados células, las cuales están compuestas aproximadamente por un 80% por agua.

Se puede considerar a modo de simplificación, que a la temperatura corporal interna ($36\text{ }^\circ\text{C}$), el agua de las células y los distintos sustratos, se comportan como líquidos diferentes, con distintos coeficientes de solubilidad [k] de absorción del gas inerte.

Esto quiere decir que, cada sustrato del cuerpo puesto en contacto con un gas inerte, dará como resultado una curva de saturación diferente, característica del conjunto sustrato/solvente considerado. La forma de la curva depende de las características de cada componente del sistema, y de factores externos a ellos como son la Presión [P] y la Temperatura [T]. Para el caso de las inmersiones se puede considerar que la Temperatura [T] es constante, pero las variaciones de la Presión [P] determinarán según la Ley de Henry la cantidad de gas que se va a disolver.

En un Ambiente Normobárico, todos nos hallamos saturados de Nitrógeno [N₂] a la presión de 1 Ata, por lo cual la Presión Parcial [Pp] de este gas será 0,79 Ata, esto quiere decir que tenemos en los tejidos disuelta una cantidad determinada de gas inerte, representada en el gráfico por el punto [1x].

Si un buzo se sumerge a 20 metros de profundidad (3 bar), la presión parcial del gas se triplicará pasando a ser de 2,37 bar y, si permanece el tiempo suficiente a dicha profundidad en todos sus tejidos se disolverá tres veces más cantidad de Nitrógeno [N₂] (punto [3x] del gráfico), que cuando nos hallábamos en superficie alcanzando un nuevo estado de equilibrio, es decir que ahora sus tejidos se hallarán saturados a 3 bar.

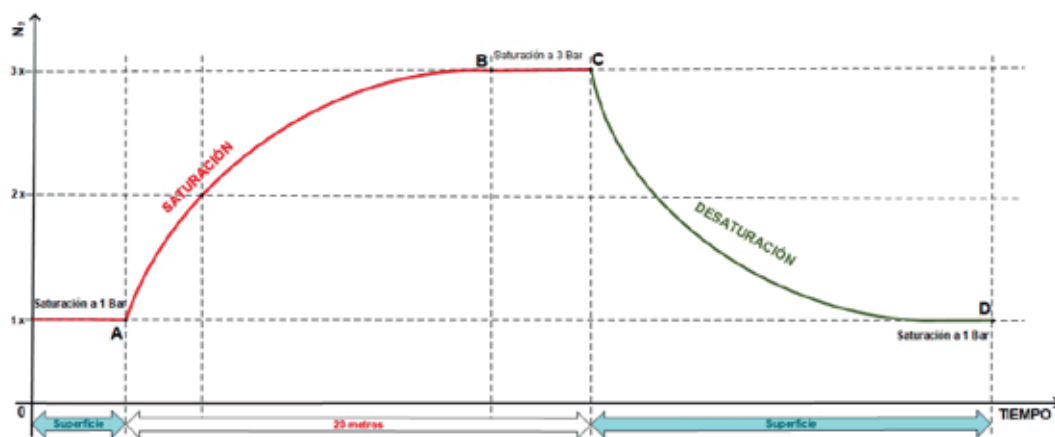


Figura 7.13: Curva de saturación y desaturación de los tejidos a 3 atmósferas absolutas.

A esta diferencia de presiones; Presión a Nivel del Mar [PNM] menos la Presión Absoluta [PAb] a la Profundidad [P] de la inmersión, se las llama Gradiente de Presión y, se lo representa con la letra griega Delta [Δ]

A un Gradiente se lo puede interpretar como el “motor” que impulsa el cambio en algunas de las variables de un proceso, así veremos entonces que existe: Gradientes de Presión Absoluta [Δ PAb], Gradiente de Solubilidad [Δ S], Gradiente de Presión Parcial [Δ Pp], Gradiente de M-Value [Δ M-V], en definitiva, un Gradiente es una diferencia en el valor de una misma magnitud entre dos estadios.

Para llegar a cada una de las células del cuerpo, los gases (Oxígeno [O₂] y Nitrógeno [N₂]) son transportados por la sangre, en dos formas:

Combinados con la hemoglobina: se transporta el Oxígeno [O₂] y el Dióxido de Carbono [CO₂], en aproximadamente 92% en volumen del aire que ingresa a los pulmones.

GASES	COMBINADO	DISUELTO
Oxígeno (O ₂)	194	6
NITRÓGENO (N ₂)	0	790
Dióxido de Carbono (CO ₂)	28	2

Tabla 7.f: Cantidad de moléculas transportadas por la sangre

Disuelto en la sangre: Es transportado el total del Nitrógeno [N_2] 100%, el Oxígeno [O_2] en aproximadamente un 3 % y el Dióxido de Carbono [CO_2] en aproximadamente un 5%.

Esto quiere decir que, si a Presión Atmosférica [PAT] ingresan 1.000 moléculas de aire al sistema respiratorio, y de este pasan al sistema circulatorio, este transportará cada gas en una de estas formas, según muestra el cuadro:

Los gases que se disuelven en los diferentes sustratos sufren el siguiente proceso, el Oxígeno [O_2] es metabolizado y utilizado por las células en sus funciones vitales, el Dióxido de Carbono [CO_2], catabolizado, y retirado del sistema a través de los sistemas circulatorio y respiratorio, mientras que el Nitrógeno [N_2] permanece inerte, ingresando, saliendo y disolviéndose en la sangre y otros sustratos de igual modo que lo hace el gas en las bebidas gaseosas.

Al aumentar la presión parcial de cada gas en los alvéolos se produce un Gradiente de Presiones Parciales [ΔPp] entre estos y la sangre impulsando a que un mayor volumen de gas se disuelva en esta, pasando dicha cantidad a duplicarse, triplicarse o más, buscando un nuevo equilibrio el cual es fusión de la presión y el tiempo de exposición o permanencia en el fondo.

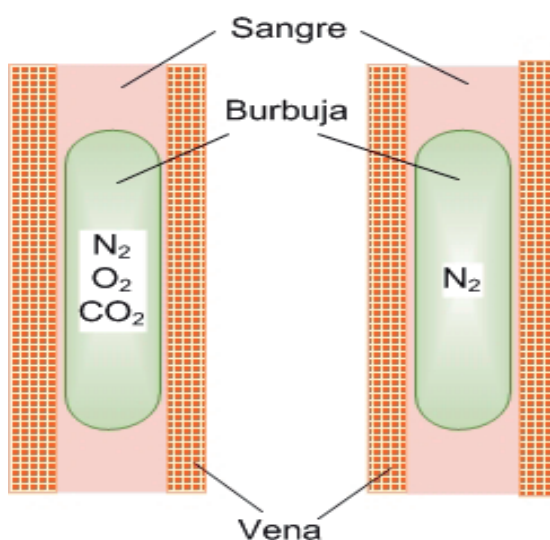


Figura 7.14: Burbuja de aire que se ha disuelto en la sangre

De este modo la sangre llegará a un estado de sobresaturación respecto de los tejidos, produciendo entonces, un nuevo Gradiente de Presiones Parciales [ΔPp] entre la sangre y los diferentes sustratos.

Ahora, una mayor cantidad de gases comienzan a disolverse en los tejidos buscando establecer un nuevo estado de equilibrio entre la sangre y los tejidos.

La cantidad de gas inerte (Nitrógeno [N_2]) que disuelve en cada tejido depende fundamentalmente de tres factores:

- ✓ Primero: por la Ley de Henry del coeficiente k, de cada conjunto tejido/gas inerte.
- ✓ Segundo: del Gradiente Total de Presiones Parciales [ΔPp].
- ✓ Tercero: de la perfusión, que es la red vascular que irriga cada tejido.

En conclusión, la cantidad de gas inerte (Nitrógeno [N_2]) disuelto en un tejido depende exclusivamente de tres factores:

- ✓ de la Profundidad.
- ✓ del Tiempo de Fondo.
- ✓ del Tipo de tejido involucrado.

Estos factores hacen que los tejidos lleguen a la saturación en diferentes tiempos. Los tejidos altamente irrigados por vasos importantes, como por ejemplo el cerebro, corazón, riñón, etc. llegan a saturarse más rápido que, otros menos irrigados como los huesos, tendones o grasas acumuladas.

Así la sangre que posee una extensa superficie de contacto con los alvéolos pulmonares, se satura casi al 100% en 10 minutos. Órganos sumamente irrigados como, el Cerebro, Hígado, Riñones y Pulmones, se saturan en igual tiempo. Otros, como los Músculos y el Cerebelo lo hacen en entre los 30 y 50 minutos. El Tejido Conectivo y la Médula Espinal se saturan entre los 100 y 300 minutos. Los tejidos ricos en materias grasas, como la médula ósea, tejido adiposo subcutáneo, grasas abdominales y cartílagos, alcanzan la saturación en un período entre 6 y 12 horas

De lo ante dicho se obtienen las siguientes conclusiones fundamentales:

1. La saturación de los tejidos es un fenómeno de difusión, que se produce más rápidamente cuanto mayor sea el Gradiente de Presiones Parciales [ΔPp], es decir la diferencia ente la Presión Parcial del Nitrógeno [PpN_2] en los tejidos y el aire respirado.
2. La absorción de gas es siempre más rápida al comienzo del proceso y lenta sobre el final, siguiendo una curva exponencial, del tipo:

$$y = A \times (1 - e^{-kt})$$

3. El tiempo necesario para alcanzar la saturación de un sustrato determinado, es siempre constante, independientemente del volumen de gas disuelto por los tejidos,
4. El tiempo necesario para alcanzar la saturación de un sustrato determinado es independiente de la profundidad de la inmersión.
5. El volumen de gas inerte disuelto en un tejido es función de la profundidad y del tiempo de exposición.
6. El tiempo necesario para la desaturación y la curva de desaturación, en teoría deberán ser iguales a las de saturación.
7. Las grasas disuelven un volumen de Nitrógeno [N_2], cinco veces mayor que el resto de los tejidos acuosos.

Cuando el buzo asciende, da comienzo al proceso inverso, cae la Presión Absoluta [PAb] dentro de los pulmones haciendo que la sangre quede en un estado de sobresaturación de gas inerte, esto produce un Gradiente de Presión Parcial [ΔPp] inverso al anterior, comenzando a migrar Nitrógeno [N_2] desde la sangre hacia los pulmones. De este modo se rompe nuevamente el equilibrio entre la sangre y los tejidos quedando estos ahora sobresaturados respecto de aquella. Ahora son los tejidos los que comienzan a liberar el Nitrógeno [N_2] disuelto, que se incorpora al torrente sanguíneo.

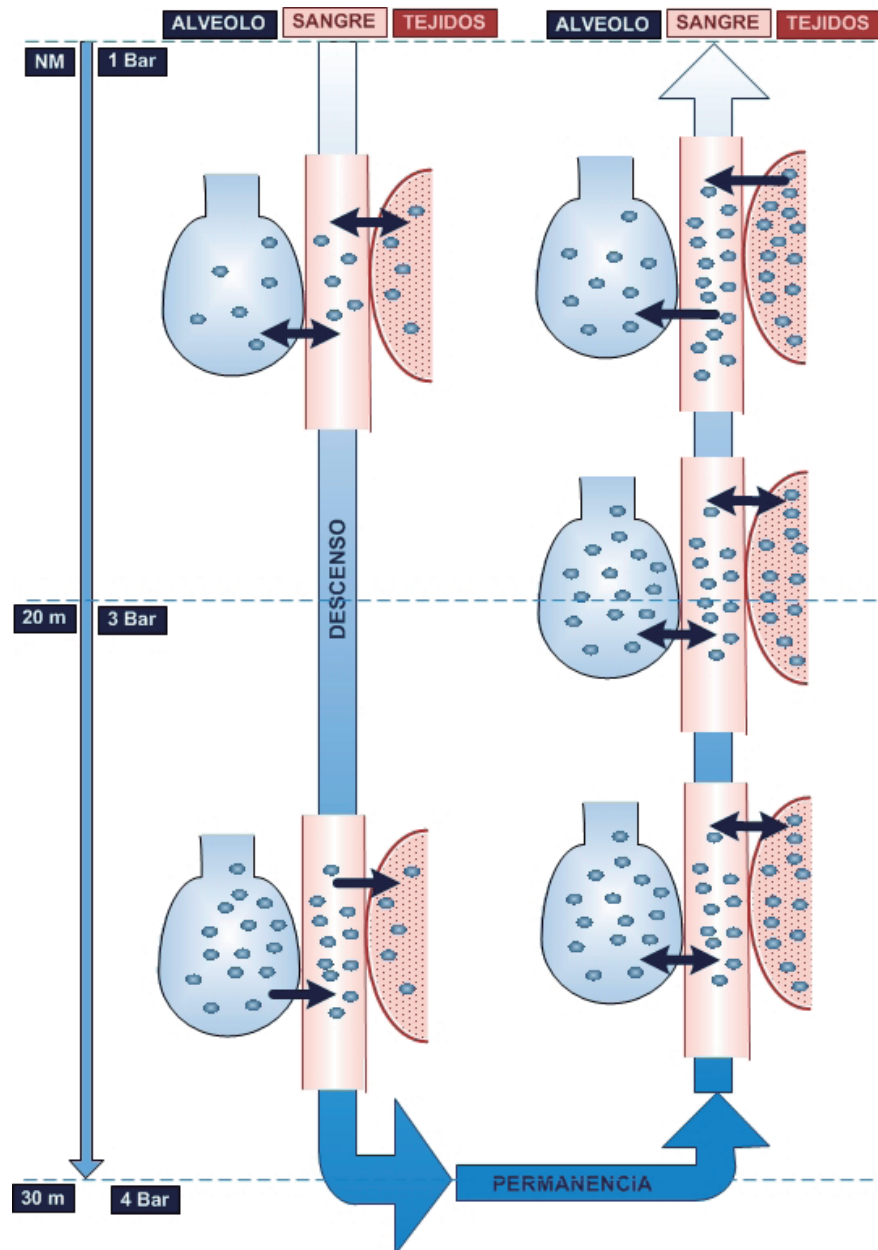
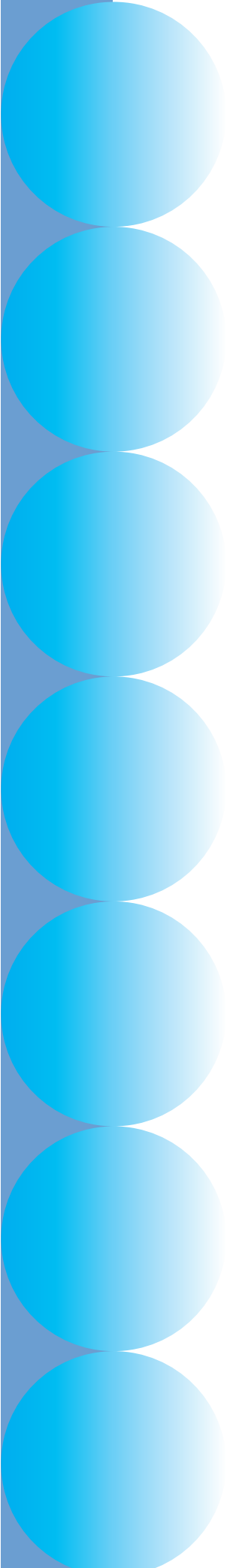


Figura 7.15: Proceso de Absorción y Liberación de gases.

Si todo este proceso se realiza en forma moderada la sangre y los tejidos son capaces de mantener disuelto el exceso de Nitrógeno [N_2], transportando a este hacia los pulmones desde donde será evacuado a través de las vías respiratorias.



Estudios recientes realizados con ultrasonido con aplicación del efecto Doppler, han demostrado que durante todo el proceso de compresión y descompresión en la sangre se forman burbujas extremadamente pequeñas, llamadas “micro burbujas”, “burbujas silenciosas” o, “burbujas asintomáticas” que son transportadas por la sangre a través de todo el sistema circulatorio hacia los pulmones, las cuales no producen síntomas masivos de la Enfermedad de Descompresión. Como se verá más adelante, la presencia de estas “micro burbujas” es de extrema importancia para el desarrollo y comprensión de los M-Value, base de cálculo de los algoritmos matemáticos modernos.

Pero si se realiza un ascenso violento, o se violan los Tiempos de Fondo [TF] para los Límites de No descompresión [LND] la sangre y los tejidos son incapaces de retener al Nitrógeno [N_2] en solución, liberando este en forma abrupta, lo cual genera la producción de burbujas de gran tamaño y lleva al buzo a sufrir síntomas masivos de la Enfermedad de Descompresión.

Este mecanismo puede asimilarse al ejemplo ya descrito sobre que sucede al destapar una botella de bebida gaseoso. Si se quita la tapa lentamente se verá que es ínfima la cantidad de burbujas que la solución deja escapar, mientras que si se destapa en forma rápida las burbujas de gas escapan abruptamente y en gran cantidad del seno del líquido.

Cuando se producen burbujas de gran tamaño dentro del torrente sanguíneo, al ir ascendiendo el buzo, estas cumpliendo con la ley de Boyle-Mariotte, incrementan más aún su volumen. Al alcanzar las burbujas cierto tamaño, estas se presentan como un cuerpo extraño al organismo, lo cual dispara una serie de mecanismos complejos a partir del sistema inmunológico. Este, reacciona liberando plaquetas y glóbulos blancos que atacan a las burbujas e incrementan más su tamaño, hecho que favorece la obturación de los vasos.

Si las burbujas se desarrollan dentro de un tejido, al incrementarse su volumen presionarán los vasos sanguíneos que se hallan en sus adyacencias, impidiendo la circulación sanguínea por compresión de estos y la falta de oxigenación de las células.

En ambos casos, el resultado final es el mismo, la interrupción de la provisión de Oxígeno [O_2] a los tejidos y su daño por hipoxia, lesiones que pueden llegar a ser permanente.

De lo antes descrito se deduce que los síntomas emergentes de un accidente por descompresión dependen del tamaño de las burbujas, el lugar donde esta se forman y del punto donde estas pueden llegar a alojarse.

De la cédula de buceo (Profundidad [P] y Tiempo de Fondo [TF]) que se realice, depende el sitio donde se formen las burbujas.

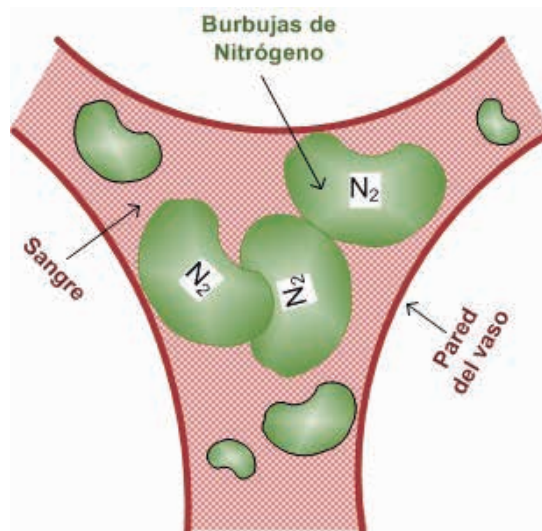


Figura 7.16: Formación de burbujas en la sangre, luego de buceos profundos y de corto tiempo de fondo

Así, en inmersiones profundas y poco tiempo de exposición, por ejemplo, a cincuenta metros por diez minutos, producirán una alta saturación de Nitrógeno [N_2] en los tejidos rápidos, no dándole tiempo a los tejidos lentos a saturarse.

Bajo estas condiciones en un ascenso inadecuado el sitio más probable de formación de las burbujas será la sangre, pues el Nitrógeno [N_2] no habrá tenido el suficiente tiempo como para producir una saturación importante de los tejidos lentos, y por el otro lado, los pulmones no poseerán la suficiente capacidad de evacuación como para eliminar el exceso del gas.

Si en cambio se realiza una inmersión a baja profundidad, por un tiempo prolongado, por ejemplo 60 minutos a veinte metros, es probable que las burbujas se formen en los tejidos lentos, puesto que el tiempo de ascenso será tan corto que el Nitrógeno [N_2] no tendrá tiempo para pasar al torrente sanguíneo.

Ley de Graham

Thomas Graham (1805-1869) Químico inglés estudió los fenómenos de difusión de los gases. Se considera el fundador de la química coloidal, estableció la diferencia entre coloides y cristaloides e, introdujo el concepto de ácido polibásico. Realizó estudios sobre osmosis, diálisis y solubilidad de gases y sales en líquidos y, enunció la ley que lleva su nombre sobre la velocidad de difusión de los gases.

Como se ha visto, un gas encerrado en un volumen determinado ocupa todo el recipiente, este fenómeno se conoce con el nombre de difusión. Dicho fenómeno se pone de manifiesto con un sencillo experimento. Si se libera en una habitación cerrada un gas con un olor característico, como por ejemplo amoníaco, será percibido casi instantáneamente en todo el recinto. En experimentos con diferentes gases se comprobó que los gases de menor masa molecular difundían con mayor rapidez la Ley de Graham explica este fenómeno:

“La velocidad de difusión [R] de un gas es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su masa molecular [m]”.

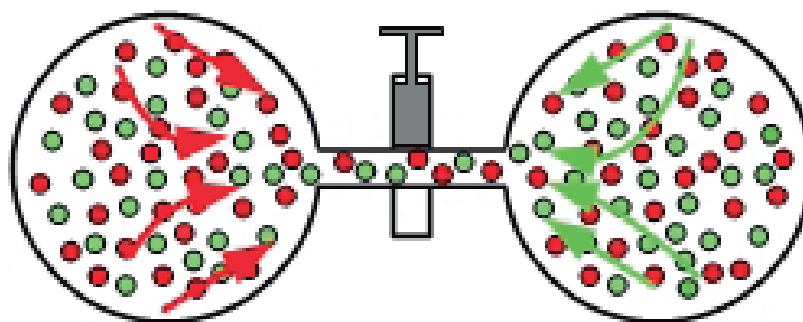


Figura 7.17: Ley de Graham

Su expresión matemática es:

$$R = \frac{k}{\sqrt{m}} \quad (k = \text{Constante de Graham})$$

Si se llenan con gases diferentes dos los compartimentos de un recipiente como el de la figura y luego se los deja en contacto se verificará que por efecto de la difusión al cabo de unos instantes se obtendrá una mezcla gaseosa.

La ley de Graham, muy conocida en el campo de la físico/química, ella explica en forma teórica como difunden los gases a través de membranas finas. Muchos años después de expresada y demostrada la ley, Buhlmann la aplica a sus estudios sobre la difusión de los gases inertes en el organismo, a partir de los cuales desarrolla su algoritmo.

La ley además explica porque se forman las mezclas gaseosas, cuando en un cilindro de buceo se realiza la combinación de dos o tres gases para fabricar mezclas respirables como las Nitrox, Heliox, o Trimix.

■ De lo ideal a lo real

Recordemos que en el tema Ecuación General de los Gases Perfectos, se definió al gas perfecto o ideal aquel que cumplía exactamente con las leyes de Boyle y Mariotte y de Charles – Guy Loussac. La realidad demuestra que el comportamiento de los casos reales se aleja del comportamiento ideal esto quiere decir que el producto de $P \times V$, no es exactamente constante para todos los valores de Presión [P] y Temperatura [T]. Fuera de los valores normales de Presión [P] y Temperatura [T] ($0\text{ }^{\circ}\text{C} = 273\text{ K}$ y 1 Ata) los valores calculados aplicando la Ecuación de Estado de los Gases Ideales, son diferentes a los valores obtenidos en forma experimental. En los gases reales la ecuación general de estado se cumple sólo cuando existen altas temperaturas y bajas presiones, es decir cuando el volumen molecular es insignificante respecto del volumen del envase que los contiene.

En un botellón de buceo presurizado el estado de los gases contenidos dista mucho de ser el ideal por lo cual la Ecuación General de Estado no predice adecuadamente las condiciones de este punto esta desviación del comportamiento ideal puede ser explicada por el hecho de que las moléculas no pueden moverse libremente en todas direcciones y sufren frecuentes rebotes entre ellas y las paredes de cilindro que las contienen. Y como las distancias entre las mismas ya no es significativamente grande respecto de su diámetro, comienzan a tener injerencia las fuerzas de atracción entre ellas, y del comportamiento de estas independiente una de otra.

La proximidad entre la molécula depende de dos parámetros que son la Presión [P] y Temperatura [T]. Las bajas presiones y altas temperaturas permiten a las moléculas mantenerse distanciadas y que su comportamiento sea próximo al predicho por ecuación general de los gases ideales.

A veces las bajas temperaturas y altas presiones, puede suceder en el interior de un botellón de buceo, esto tiende a hacer decrecer la distancia entre moléculas y entonces el gas muestra una significativa diferencia con el comportamiento ideal.

Bajo condiciones normales la diferencia entre el comportamiento real y el tratamiento ideal tiene poca importancia para los buzos. Tal vez, se puede presentar que la diferencia de presiones en un botellón de buceo es significativamente diferente entre la real y la ideal calculado, esta diferencia es particularmente importante cuando se calculan los componentes de una mezcla graciosa diferente a la del aire, o en el cálculo de mezclas, que la disponible a la hora de planificar un buceo profundo.

Ecuación de Van Der Waals

Sobre el final del siglo XIX, el químico alemán Johans Van der Waals realizó estudios sobre comportamiento del Ecuación General Estado de los Gases Ideales, midiendo la Presión [P] y el Volumen [V] de un gran número de gases diferentes con el objeto de demostrar que la simple idea de definir un gas ideal era inadecuada para predecir el comportamiento de este y que por lo tanto era necesario modificar ecuación general estado de los gases ideales. Van der Waals, asumió las siguientes pautas:

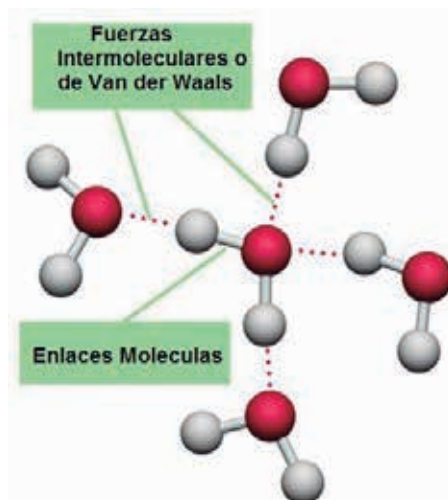


Figura 7.18: Fuerzas de Van Der Waals

1. A bajas Presiones, las fuerzas de atracción entre las moléculas se reducen con la variación de la Presión [P]. Por esta causa, el producto de P x V es menor al esperado.
2. A altas presiones las moléculas se encuentran más próximas unas de otras, por lo cual el volumen ocupado por cada molécula en particular, ya no es insignificante respecto del volumen total ocupado por el gas. Recordemos que altas presiones de densidad de un gas, es muy superior a la densidad del mismo a presión normal, porque la cantidad de moléculas halladas por unidad de volumen es mayor. Y como el Volumen [V] en la Ecuación General de los Gases Ideales, representa sólo el espacio libre disponible para que las moléculas de gas se muevan libremente, se hace necesario introducir una corrección por la mayor cantidad de moléculas que ocupan el mismo espacio. Este factor de corrección nos encuentra en la ecuación general estado de los gases ideales.

Para que la Ecuación General Estado de los Gases Ideales describa más exactamente el comportamiento de un gas real, Van der Waals introdujo las siguientes modificaciones:

1.- La presión ideal debe ser presentada como:

$$P_{(ideal)} = P + \frac{a n^2}{V^2} \quad (1)$$

donde:

P= presión absoluta medida

V= volumen

a= constante característica de cada gas: representa las fuerzas de atracción entre las moléculas, esta es diferente para cada gas y, ha sido determinada a través de observaciones empíricas y, se pueden hallar en todo manual de ingeniería química.

n= número de moles presentes

2.-el Volumen Ideal debe ser presentado como:

$$V_{(ideal)} = V - n b \quad (2)$$

Donde:

V= volumen medido

b= constante característica de cada gas. Representa el volumen ocupado por el mayor número de moléculas, esta es diferente para cada gas y, ha sido determinada a través de observaciones empíricas y, se pueden hallar en todo manual de ingeniería química.

La ecuación general estado de los gases ideales, dice:

$$P \times V = n R T \quad (3)$$

donde:

$$P = \text{Presión Absoluta [at]}$$

$$V = \text{Volumen [l]}$$

$$T = \text{Temperatura Absoluta [°K]}$$

$$n = \text{moles gramo [mol]}$$

$$R = 0,08207 \frac{l \times at}{mol \times ^\circ K}$$

Reemplazando las expresiones descritas en (1) y (2) en la ecuación general estado (3) se tiene:

$$\left(P + \frac{a n^2}{V^2} \right) \times (V - n b) = n R T$$

Observe en la ecuación anterior que cuando:

$$\frac{a}{V^2} \Rightarrow 0, \text{ el cociente tiende a cero y}$$

$$b \Rightarrow 0, \text{ la constante } b \text{ tiende a cero, el producto tiende a cero.}$$

la ecuación de Van der Waals, se reduce a la ecuación general de estado de los gases ideales.

Ejemplo:

Determinar la presión en el interior de un cilindro de buceo de 80 ft³, de aluminio producido por la firma Luxfer cargado con aire a su presión de trabajo, con una temperatura ambiente de 25 °C utilizando la ecuación general estado de los gases ideales y la ecuación de Van der Waals, para los gases reales.

De los manuales de la firma se obtienen las especificaciones del botellón:

Código Material	Presión Trabajo - bar -	Capacidad Carga - l -	Volumen Interno - l -	q _{ext} - mm -	Altura - mm -	Peso Vacío - kg -	Peso en H ₂ O - kg -	Flotabilidad		
								lleno - kg -	medio - kg -	vacío - kg -
S808	207	2214,60	11,20	203,20	582,40	16,00	11.20	1.66	0.33	1.00

Tabla 7.g.- Especificaciones del botellón Luxfer de 80 ft³

Primero calculamos el número de moles en el botellón a la presión de trabajo:

$$n = \frac{v(l)}{22,4 \frac{l}{mol}} = \frac{2214,6l}{22,4 \frac{l}{mol}} = 98,86mol \cong 100mol$$

Segundo se calculan la temperatura absoluta:

$$T(^{\circ}K) = t(^{\circ}C) + 273 = 25^{\circ}C + 273 = 298^{\circ}K$$

De la Ecuación general estado de los gases ideales:

$$P = \frac{nRT}{V}$$

Reemplazando:

$$P_{ideal} = \frac{98,86 \text{ mol} \times 0,0821 \frac{l \times At}{^{\circ}K \times mol} \times 298^{\circ}K}{11,2 l} = 215,95 \text{ At}$$

De la Ecuación de Van der Waals:

$$P = \frac{nRT}{V - nb} - \frac{an^2}{V^2}$$

Comparando P_{real} y P_{ideal} :

$$\Delta P = P_{ideal} [At] - P_{real} [At] = 215,95 \text{ At} - 211,39 \text{ At} = 4,56 \text{ At}$$

Calculado la variación porcentual se tendrá:

$$\Delta P_{\%} = \frac{\Delta P}{P_{real}} \times 100 = \frac{4,65 \text{ At}}{211,39 \text{ At}} \times 100 = 2,16\%$$

Conclusiones:

Esta variación del 2,16% tiene escasa importancia en el campo del buceo recreativo donde se realizan inmersiones exclusivamente con aire y a Presiones absolutas no mayores de 7 At (60 metros de profundidad), pero cuando se avanza hacia el terreno del Buceo Técnico, el cual abarca inmersiones con mezclas de dos o tres componentes, en las cuales la proporción de Oxígeno (O_2) es menor a la normal (21%), comienza a tener relevancia, puesto que cualquier fluctuación en el cálculo de los componentes de la mezcla es importante.

Compresibilidad

Otro acercamiento para comprender la diferencia de comportamiento entre los gases reales y los gases ideales, es el concepto de compresibilidad. Al estudiar la Teoría Atómica de la materia y la Teoría Cinética de los Gases Ideales, se demostró que las moléculas que los formaban poseen muy pequeñas fuerzas de atracción entre ellas y, que por este motivo ocupaban todo el volumen del recipiente que los contiene. Este fenómeno hace que la distancia entre dos moléculas de un gas contenido dentro de un recipiente sea infinitamente superior a su diámetro. Esta característica es la que hace que los gases y mezclas gaseosas sean altamente compresibles.

$$P \times V = z \times n \times R \times T$$

En un escenario como el descrito, la expresión matemática que predice el comportamiento de un gas real es la siguiente:

Donde:

P= Presión Absoluta

T= Temperatura Absoluta

V= Volumen

z= Factor de Compresibilidad.

n= Numero de Moles

R= Constante universal de los gases

El Factor de Compresibilidad (**z**), es característico de cada gas y varía con la presión y la temperatura y se determina en forma experimental. Los valores del mismo para los diferentes gases pueden encontrarse en la mayoría de los manuales de Ingeniería Química.

Para un gas ideal el Factor de Compresibilidad (**z**) es igual a 1, con lo cual la ecuación (1) queda reducida nuevamente a la Ecuación General de Estado de los Gases Ideales.

Conclusiones

La Ecuación General de Estado de los Gases Ideales, predice forma bastante exacta el comportamiento en de los gases reales cuando las condiciones son aproximadas a condiciones normales de Presión y Temperatura. A medida que nos alejamos de estas se hace necesario adicionar factores de correlación que permiten compensar las desviaciones que se producen. De este modo nace la Ecuación de Van der Waals para los gases reales. Esta, aplicada a las condiciones presión del buceo produce una adecuada correlación entre los valores ideales y los reales.

Ley de difusión de Fick

La Ley de Fick es una ley cuantitativa que describe diversos casos de difusión de materia o energía en un medio en el que inicialmente no existe equilibrio químico o térmico. Recibe su nombre del médico y fisiólogo alemán Adolf Fick (1829-1901), quien la enunció en 1855.

Describe la Tasa de Transferencia de un gas a través de una membrana (o capa de tejido) y se enuncia:

“La magnitud de difusión es proporcional al gradiente de las presiones parciales de los gases o de las concentraciones de los líquidos”

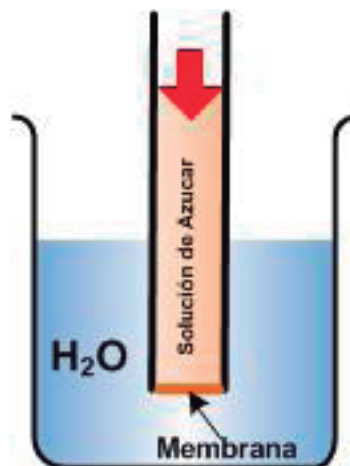


Figura 7.19: Ley de Fick

Dicha Tasa de Transferencia, es proporcional a superficie expuesta, así como a la diferencia entre las presiones de sus dos fases e inversamente proporcional al espesor de la membrana/tejido. Además, la velocidad de difusión es proporcional a la constante de difusión (particular al tipo de tejido y de gas que interviene).

En situaciones en las que existen gradientes de concentración de una sustancia, o de temperatura, se produce un flujo de partículas o de calor que tiende a homogeneizar la disolución y uniformizar la concentración o la temperatura. El flujo homogeneizador es una consecuencia estadística del movimiento azaroso de las partículas que da lugar al segundo principio de la termodinámica, conocido también como movimiento térmico casual de las partículas. Así los procesos físicos de difusión pueden ser vistos como procesos físicos o termodinámicos irreversibles.

Criterios

La ley de Difusión de Fick toma en cuenta ciertos parámetros para determinar el nivel de difusión de una especie dada:

Magnitud de gradiente: un mayor gradiente acelera la difusión;

Superficie de difusión;

Difusividad másica entre A y B, definida para una especie A difundiendo en una especie B.

Ecuación de Poiseuille

La ecuación que gobierna el movimiento de un fluido dentro de un tubo, es conocida como la Ecuación de Poiseuille. Lleva en consideración la viscosidad, aunque en realidad esta ecuación solo es aplicable para el flujo laminar.

La sangre fluyendo por las venas y arterias, no es exactamente un flujo laminar. Pero aplicándose la Ecuación de Poiseuille para esa situación se da una aproximación razonable, y conlleva implicaciones interesantes.

La Ecuación de Poiseuille para la Tasa de Fluido [Q] (volumen por unidad de área), se expresa como:

$$Q = \frac{\Pi r^4 (P_1 - P_2)}{8 \eta L}$$

Donde:

P1-P2= diferencia de presión entre los extremos del tubo.

L= largo del tubo.

r= Radio del tubo.

η = Coeficiente de Viscosidad.

Para la sangre, el coeficiente de viscosidad es cerca de 4×10^{-3} Pas.

Lo más importante es, que la Tasa de Flujo [Q] es fuertemente dependiente del Radio [r] del tubo a la cuarta potencia: r^4 .

Entonces, una disminución relativamente pequeña en el Radio del tubo [r] significa una drástica disminución en la tasa de flujo.

Disminuyendo el Radio por un factor 2, se disminuye el flujo por un factor 16. Esta, es una buena razón para preocuparnos con los niveles de colesterol en la sangre, o cualquier obstrucción de las arterias. Un pequeño cambio en el radio de las arterias puede significar un gran esfuerzo para el corazón el hacer bombear la misma cantidad de sangre por el cuerpo.

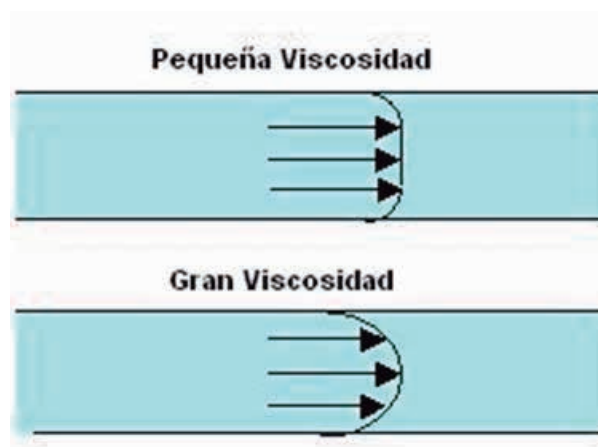


Figura 7.20: Velocidad del fluido

Bajo todas las circunstancias en que podemos verificar experimentalmente, la velocidad de un flujo real disminuye para cero cerca de la superficie de un objeto sólido.

Una pequeña capa de fluido cercana a las paredes de un tubo posee velocidad cero. La velocidad del fluido aumenta con la distancia a las paredes del tubo. Si la viscosidad de un fluido es chica, o el tubo posee un gran diámetro, una gran región central fluirá con velocidad uniforme.

Para un fluido de alta viscosidad, la transición ocurre a lo largo de una gran distancia y en un tubo de pequeño diámetro la velocidad puede variar a lo largo del tubo.

Si un fluido está fluyendo suavemente por a través de un tubo, el fluido está en un estado de flujo laminar. La velocidad en un determinado punto no cambia en valor absoluto y en la dirección y sentido.

Decimos que el agua está fluyendo en un estado de flujo continuo. Un pequeño volumen de fluido se mueve a lo largo de una línea de flujo, y distintas líneas de flujo no se cruzan.

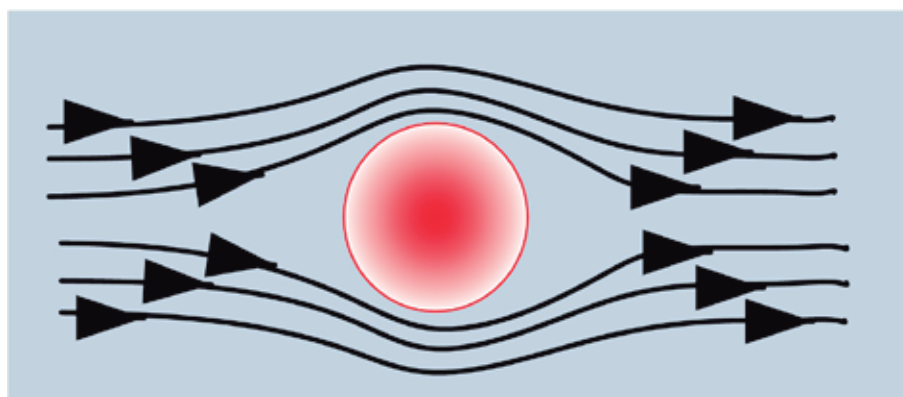


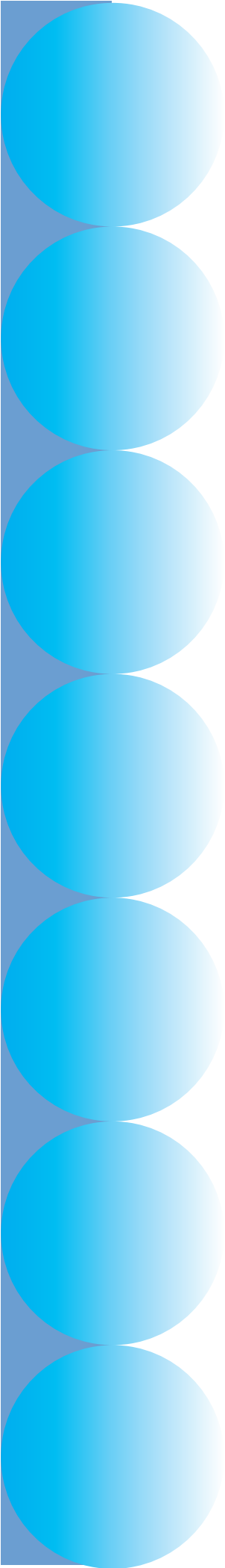
Figura 7.21: Flujo a través de una esfera

En el flujo laminar la ecuación de Bernoulli nos dice que en las regiones donde la velocidad es mayor, la presión es menor. Si las líneas de flujo se comprimen en una región, la presión es menor en dicha región.

En el caso de los gases, la ecuación de Bernoulli puede ser utilizada a un flujo laminar si la velocidad del flujo es mucho menor que la velocidad del sonido en el gas. En el aire podemos utilizarla si la velocidad es menor a 300 km/h.

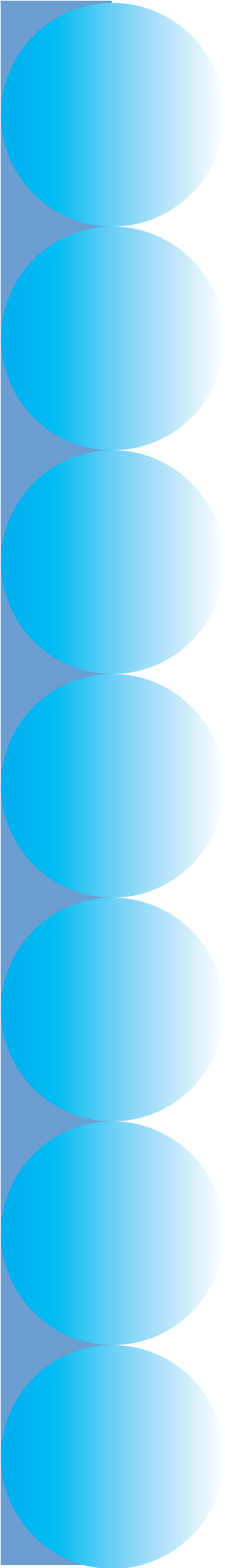
Si un fluido con flujo laminar fluye alrededor de un obstáculo, el fluido ejerce una fuerza de arrastre sobre el obstáculo. Las fuerzas de fricción aceleran el fluido para atrás (en contra a la dirección del flujo) y el obstáculo para adelante (en la misma dirección del flujo).

La figura describe un fluido pasando por una esfera en un sistema de referencia, o una esfera moviéndose por a través de un fluido en otro sistema de referencia.



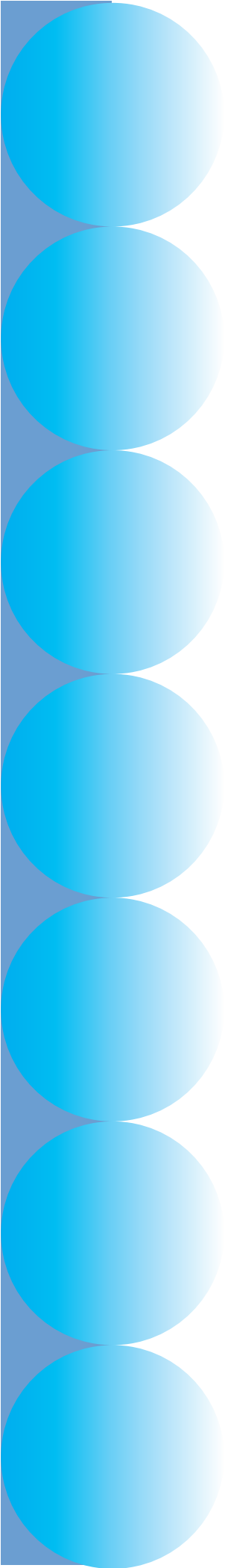
Bibliografía





Bibliografía:

- Auletta, Jorge Luis, Los secretos del buceo, Editorial Lidium*
- Sears, F. W. y Zemansky, Mark W; Física General, Editorial Aguilar.*
- Fernandez, J. S. y Galloni, E. E.; Física Elemental, Editorial Nigar*
- Vian, A. y Ocon, J.; Elementos de ingeniería química. Editorial Aguilar.*
- Allard, R.; Sistema internacional de medidas, Editorial Limusa Wiley.*
- Loyarte, R. G.; Física general, Editorial de la UNLP.*
- Lopez Alegret, P.; La fotografía submarina, Editorial De Vecchi.*
- Di Gaetano, M; Il libro de la fotografía subacuea, Edizione La Cuba.*
- Taylor, L.; A gas laws primer*
- Taylor, L; Estimating air (Breathig Gas) consumption*
- Taylor, L.; Calculating gas density at depth*
- Taylor, L.; Archimedes, a gold thief and buoyancy*
- Taylor, Larry "Harris" Ph.D; At-Altitude Arithmetic*
- Pyle, R.; Física del buceo y "Fiziogía"*
- Mauvecin, G. y Espinosa, C.; Buceo, Aspectos médicos y Fisiológicos*
- Club Regatas Santa Fe - Aprender a Bucear*
- Asimov, Isaac; "Cien Preguntas Básicas Sobre la Ciencia", Alianza Editorial (1977)*
- Technical Diver International -TDI-, Manual de Nitrox Básico.*
- Technical Diver International -TDI-; Manual de Nitrox Avanzado.*
- US Navy; Manual de buceo militar Rev. 7*
- NOAA; Dive Manual*
- Dr. M. Guzmán Peredo, Dr. G. Ezquerro Madrigal; El buceo en altitud*
- Federación Española de Actividades Subacuaticas -FEDAS-; Manual de Nitrox Básico.*
- Federación Española de Actividades Subacuaticas -FEDAS-; Manual de Nitrox Avanzado.*
- Wienke, Bruce R. - O'Leary, Timothy R.; Technical Diving Primer And Workbook - RGBM*
- Technical Series 7*
- Revista Buceo World*
- Revista Aquanet*



Índice Temático

A	
Absorción y liberación de gas.....	144
Agentes físicos.....	55
Agua y/o vapor de agua.....	35
Aislación térmica.....	64
Análisis de las aletas de buceo.....	81
Análisis de las aletas de buceo.....	82
Análisis de un reguladores de demanda.....	87
Angulo crítico.....	68
Atmósfera tipo.....	36
B	
Bibliografía:.....	163
C	
Cálculo de la presión absoluta y la profundidad.....	100
Calidad del aire.....	32
Calor y temperatura.....	59
Cambio de estado.....	22
Cantidad total de luz.....	71
Causas externas.....	122
Causas internas.....	122
Ciclo del agua.....	48
Compresibilidad.....	156
Concepto de presión.....	94
Conclusiones.....	85
Conclusiones:.....	136
Contaminantes del aire.....	34
D	
De lo ideal a lo real.....	151
Densidad.....	89
Densidad absoluta.....	49
Densidad del agua.....	49
Densidad del agua, salinidad, compresibilidad.....	89
Densidad del aire.....	31
¿Qué sucede con la Densidad [δ] del Aire?.....	32
Dinámica del movimiento de las aletas.....	81
Dióxido de carbono [CO ₂].....	34
Distintos tipos de agua.....	50
E	
El agua.....	47
El aire.....	29
El movimiento del agua.....	51
El ojo humano.....	72
El sistema internacional de unidades.....	11
El sonido.....	55
Estados de la materia.....	21
F	
Flotabilidad.....	106
Flotabilidad del cuerpo humano.....	107
Fuerza.....	77
I	
Instrumentos de medición.....	100
Introducción al conocimiento de los gases.....	39

L	
La absorción cromática	70
La atmósfera.....	27
La atmósfera.....	27
La difracción	69
La gravedad.....	77
La luz.....	65
La materia y sus estados.....	21
La reflexión.....	66
La salinidad	49
La temperatura	50
Ley general de estado de los gases ideales	126
Leyes de los gases.....	115
Los gases	39
Los gases y las mezclas gaseosas	39
M	
Manómetros tipo "Tubo de Bourdon".....	101
Mezclas gaseosas	44
Monóxido de carbono [CO].....	34
O	
Óxidos de nitrógeno	35
P	
Partículas sólidas	35
Pequeña historia de las aletas de buceo.....	81
Peso del aire.....	91
Presión absoluta.....	98
Presión atmosférica.....	28
Presión atmosférica.....	95
Presión hidrostática	97
Presión parcial crítica.....	135
Profundímetros digitales.....	102
R	
Reflotamiento con aire	107
Representación gráfica de las fuerzas. Vectores	78
Resumen	36
S	
Sabores y colores.....	35
Saturación y desaturación de los tejidos.....	144
Sistema de unidades.....	11
T	
Tablas de equivalencias	14
Temperatura absoluta.....	60
Temperatura del aire	30
Teoría cinética de los gases.....	113
Teoría molecular de la materia	22
Trabajo de una fuerza.....	85
Transformaciones adiabática.....	63
Transmisión del calor.....	61
U	
Unidades de presión.....	13
unidades SI de base.....	13
Unidades SI de base y suplementarias.....	12
Unidades SI derivadas utilizadas en buceo con nombres especiales.....	12
Unidades SI derivadas utilizadas en buceo que se expresan a partir de	
V	
Vapores de aceite.....	35
Variación de la presión absoluta con la altitud	99
Visión normal.....	72
Visión subacuática.....	73



**Conceptos
fundamentales
de física del buceo**



**Federación Argentina de
Actividades Subacuáticas**



CMAS

**Confederación Mundial de
Actividades Subacuáticas**

