



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

MEDIDOR DE NITRÓGENO RESIDUAL

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECATRÓNICO
P R E S E N T A:**

JORGE ENRIQUE NOGUERA TREJO



**DIRECTOR DE TESIS:
ING. LUIS YAIR BAUTISTA BLANCO
2014**

Agradecimientos

Esta es el primer trabajo de esta extensión que realizo, con el que concluyo una etapa de mi vida e inicio otra y es por eso que quiero agradecer a varias personas que he conocido a lo largo de este trayecto.

Quiero agradecer a mi familia; mi papá, Jorge Noguera, y a mi mamá, Rosa María Trejo, por apoyarme y brindarme siempre cariño, darme consejos, motivarme a lograr mis metas y vencer mis miedos. Por estar siempre ahí cuando los necesito y por ser un gran ejemplo para mí. A mi hermana, Adriana Noguera, por ser una persona que siempre ha creído y confiado en mí, hemos compartido muchas cosas juntos. A mi hermanito, Luis Eduardo, por enseñarme a ser alguien maduro e intentar ser alguien ejemplar, por tener siempre esa chispa de alegría que ejemplifica que así debemos ser en la vida. Esta es una oportunidad para decir que los amo.

Además de mis padres y hermanos quiero agradecer a mi abuelita, a mis tíos y tías por su cariño y apoyo incondicional.

También quiero agradecer a mi director de éste trabajo, el Ing. Luis Yair Bautista, que sin él no hubiera logrado concluir mi tesis. Siempre me encaminó y me enseñó a expresar mis ideas de manera escrita, dedicó mucho tiempo a las revisiones y estuvo presionando para que acabara el trabajo, gracias por enseñarme cómo realizar el escrito para que fuera una buena tesis.

A mis maestros, por enseñarme las herramientas para ser un buen profesional, por compartir sus enseñanzas y darme consejos.

Un agradecimiento a mis profesores de buceo, Carlos Barrera y Yolanda Reynoso, que me iniciaron en la práctica de éste deporte y me dieron la oportunidad de hacer las pruebas para mi trabajo.

A mis amigos y amigas, por compartir momentos increíbles y saber que cuento con ustedes así como ustedes saben que cuentan conmigo.

A Dios, por darme esta increíble vida que he tenido.

A todos y todas ustedes, que han estado en mi vida de alguna manera, mil gracias...

Jorge Noguera

Índice

1. Introducción	1
2. Objetivo	3
3. Justificación	3
4. Hipótesis	4
5. Marco Teórico	5
5.1. Historia del buceo	5
5.2. Equipo SCUBA	12
5.3. Leyes físicas	15
5.3.1. Presión	15
5.3.2. Leyes de los Gases	17
5.3.3. Ley de Beer-Lambert	26
5.4. Efectos y enfermedades en el buceo	27
5.5. Características del equipo SCUBA	31
5.6. Descompresión	32
6. Metodología	35
6.1. Entrevistas	35
6.2. Importancia del nitrógeno residual en la sangre	40
6.3. Desarrollo de solución para medir el Nitrógeno	41
6.3.1. Diseño del Circuito	43
7. Pruebas y resultados	47
8. Análisis y discusión de resultados	55
9. Conclusiones	57
10. Trabajo a futuro	60
11. Anexos	62
12. Bibliografía	75

Índice de Imágenes

5.1. Ejército Asirio en el s. IX a.C. utilizando sacos para respirar debajo del agua	5
5.2. De izquierda a derecha, esquema de aletas de da Vinci, casco de piel, esquema de casco con picos del mismo autor	6
5.3. Campana de Guglielmo de Lorena diseñada en 1535	7
5.4. Campana de Edmund Halley en los 90`s del siglo XVII	8
5.5. Campana de buceo de acero. El visor es de vidrio	8
5.6. Traje de John Letbridge en 1715	9
5.7. Traje creado por Hans Neufeldt y Karl Kuhnke en 1923	10
5.8. Traje de Augustus Siebes	11
5.9. Principio de funcionamiento del regulador de demanda de Rouquayrol	12
5.10. Aqua-Lung	13
5.11. Gráfica de la Ley de Boyle	19
5.12. Ejemplo de la Ley de Charles/Gay Lussac	21
5.13. En la imagen del lado izquierdo la presión es menor que la del lado derecho. En el lado derecho las moléculas se han disuelto por la presión.	23
5.14. Gráfica que muestra la relación entre Profundidad, Presión y Atmósferas	25
5.15. Saturación de los tejidos	30
5.16. Equipo SCUBA	31
5.17. Ejemplo de planeación de buceo	34
6.1 Oxímetro de pulso a la izquierda y ultrasonido con efecto Doppler a la derecha	40
6.2 Haz infrarrojo que atraviesa muestra y llega al fotodiodo	41
6.3 Diseño de Circuito	42

6.4. Componentes del Circuito	44
6.5. Esquema del Circuito	45

Índice de tablas

5.1 Relación de presión absoluta, presión atmosférica y profundidad	16
5.2. Composición química del aire	17
7.1. Características del Grupo A	49
7.2. Características del Grupo B	49
7.3. Valores obtenidos del Grupo A	50
7.4. Valores obtenidos del Grupo B	51
7.5. Consumo de aire	52

1. Introducción

El planeta dónde vivimos es un lugar en dónde tres cuartas partes del planeta es agua, ya sea agua dulce o agua salada. El ser humano ha llegado a explorar la mayoría de los lugares sobre el nivel del mar, pero se conoce muy poco de los lugares debajo del agua, ya sean ríos, lagos, mares, etc. Para llegar a conocer estos lugares se ha ido desarrollando el buceo desde hace bastante tiempo.

El buceo en la actualidad además de ser una actividad científica también es considerado como un deporte. Toda actividad científica o deportiva tiene una evolución con el tiempo. Esta evolución se debe a que se están investigando otros lugares con características diferentes a los que tenemos en el exterior (presión, temperaturas, etc.) por lo que hay cambios en nuestros organismos. El cuerpo humano no está adaptado a respirar bajo el agua ni a soportar altas presiones o bajas temperaturas, por mencionar algunos ejemplos.

Cabe destacar que cuando se habla de deporte y ciencia siempre se busca tener un mejor rendimiento, y en la actualidad se utilizan muchos instrumentos (analógicos o digitales) para mejorar la experiencia, en este caso, del buceo.

Al practicar un deporte o al hacer una investigación en campo es esencial la seguridad de la persona que realiza estas actividades. Este trabajo tiene que ver con el diseño de un dispositivo de seguridad para el buceo que es innovador y podría formar parte del equipo de buceo.

En los primeros capítulos se habla de cuál es el objetivo del trabajo, las bases para realizarlo y cómo se podría realizar.

En el apartado de marco teórico se encuentra un poco de historia del buceo, de cómo ha ido evolucionando el equipo de buceo y la forma de practicarlo como se conoce

en la actualidad. Posteriormente se hace mención de las leyes físicas que se tienen que tomar en cuenta en el buceo. Se describirán también las principales enfermedades cuando no se realiza una planeación del buceo o no se sigue la planeación.

En el siguiente apartado, que es la metodología, se encuentran las entrevistas que dieron lugar para el desarrollo del circuito. La forma en que se elaboró se encuentra en el apartado diseño del circuito. Los elementos que comprueban la hipótesis planteada se muestran en el apartado de pruebas y resultados.

Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas por la implementación del circuito y se exhiben algunos de los elementos que pueden ser mejorados para posteriores iteraciones de diseño.

2. Objetivo

Diseñar un instrumento que permita obtener la medición del nitrógeno residual en la sangre después de la práctica de buceo deportivo y recreativo.



3. Justificación

Actualmente se utilizan tablas de planeación de buceo y computadoras de buceo basadas en algoritmos por lo que son datos meramente estadísticos y por lo tanto para una población muy grande.

Si no se siguen ciertos lineamientos puede haber accidentes causados por el nitrógeno residual, como las enfermedades por descompresión.

No existe un dato exacto de la cantidad de buzos que hay en el mundo, pero un dato importante es que la Asociación de Instructores de Buceo Profesionales (PADI por sus siglas en inglés) realiza 950 000 certificaciones al año de las cuales 550 000 son certificaciones de nivel de entrada u “*open water*”, que es cuando los buzos pueden alcanzar los 18 metros de profundidad. En Estados Unidos certifica al 70% de los buzos y al 55% de buzos en el mundo.



4. Hipótesis

La espectrofotometría clásica permite calcular la concentración de una sustancia en solución a partir de su absorción óptica a una longitud de onda determinada basándose en la Ley de Beer. La sustancia que se está analizando se ilumina y al medir cuanta luz absorbe se determina su concentración.

Después de hacer una inmersión de buceo hay un grado de saturación de nitrógeno residual en la sangre y los tejidos, el cual si no es controlado con las actuales tablas para buceo puede llevar a graves consecuencias e incluso la pérdida de la vida. Las tablas de buceo indican cuánto tiempo se puede estar a cierta profundidad y sirven para planear las inmersiones. En cada inmersión el cuerpo absorbe cierta cantidad de nitrógeno y cuando se realiza una segunda inmersión el cuerpo puede tener todavía nitrógeno residual. Al no planear las inmersiones adecuadamente es cuando pueden ocurrir los accidentes o enfermedades de descompresión.

Haciendo uso de la espectrometría, se puede obtener un dispositivo capaz de medir el nitrógeno residual en la sangre de una persona que ha realizado inmersiones y con ello lograr una mejor planeación del buceo disminuyendo los riesgos de enfermedades por descompresión.

▣

5. Marco Teórico

5.1. Historia del buceo

Los orígenes del buceo se remontan al deseo y la necesidad del hombre de enriquecer su comercio marítimo, en el salvamento y operaciones militares y expandir su conocimiento a través de la exploración. La palabra buzo proviene del latín *bucina*, y se refiere al cuerno que utilizaban los boyeros (personas que guían bueyes). En el ámbito acuático, estos cuernos hacen referencia al *snorkel*[1].

Desde el 885 a.C., un tallado Asirio, muestra cómo su ejército intentaba sorprender al enemigo, utilizando sacos de cuero para respirar debajo del agua como se muestra en la figura 5.1.



Fig. 5.1 Ejército Asirio en el s. IX a.C. utilizando sacos para respirar debajo del agua [2].

En el siglo V a.C. Herodoto contaba la historia de Scyllis, que dice haber utilizado un pedazo de caña como *snorkel* mientras cortaba las amarras de la flotilla del ejército del rey Persia Xerxes [2].

En el caso de las operaciones militares los buzos eran los encargados de cortar las anclas o amarres de los barcos, de perforarlos para que se hundieran y de construir fuertes para proteger su ciudad. El discípulo de Aristóteles, Alejandro el Grande, enviaba buzos para remover obstáculos del fuerte de Tyre, lo que ahora es el Líbano, en el año 332 a.C.

En el aspecto de comercio en el primer siglo a.C. las operaciones mercantiles de recuperar bienes hundidos necesitaban de buzos. Su paga era de acuerdo al riesgo que tomaban, mientras más profundo iban, más podían ganar. A una distancia de 7 metros podían reclamar la mitad de lo que sacaban, a 3.5 metros podían obtener un tercio de lo recuperado y a un metro obtenían una décima parte de lo recuperado. Se puede deducir que como en aquel tiempo la gente temía de “monstruos” marinos y además no estaba acostumbrada a realizar inmersiones tan profundas eran muy pocas las personas que se atrevían a llegar a los 7 metros. La mayoría de los que realizaban estos trabajos llegaban a los 3 metros. No se conocen casos de muertes o accidentes por descompresión, puesto que practicaban la apnea que consiste en únicamente aguantar la respiración y sumergirse el tiempo que la persona aguante [2].

Alrededor del siglo XVI, el inventor y artista italiano Leonardo da Vinci describe las primeras aletas, *snorkel* y aparato para respirar. Además diseña un casco de piel, con picos de protección para monstruos marinos, y un tubo que llegaba a la superficie para respirar, un ejemplo gráfico en la figura 5.2.



Fig. 5.2 De izquierda a derecha, esquema de aletas de da Vinci, Casco de piel, esquema de casco con picos del mismo autor [2].

Con el desarrollo de la ciencia, el estudio de los principios de la física, de la hidrostática y la aerostática durante el Renacimiento se desarrolla aún más el buceo. Durante éste período se hace la primera campana, figura 5.3, diseñada por Guglielmo de Lorena en el año 1535. Consistía en una cámara en forma de barril que descansaba sobre los hombros del buzo. En esta campana no había flujo de aire proveniente de la superficie; únicamente el volumen de aire contenido dentro de la campana, el cuál alcanzaba para algunos minutos por lo que después de cierto tiempo el gas que más predominaba en la campana era el CO₂, gas que no sirve para oxigenar nuestro cuerpo, teniendo que emerger para intercambiar gases con la superficie [3].



Fig.5.3. Campana de Guglielmo de Lorena diseñada en 1535 [3].

En los 1690's, el astrónomo inglés Edmund Halley desarrolla una campana en donde hay flujo de aire de la superficie, con el mecanismo de Papin, el cual ya utilizaba mangueras y es posible ver una imagen en la figura 5.4. Con esta nueva campana era posible permanecer hasta hora y media debajo del agua. En ese tiempo aún no se conocían los efectos de la presión en el organismo, por lo que a las personas les dolían mucho los oídos y no se conocía la maniobra de Valsalva¹, que sirve para igualar presiones tapando la boca y nariz evitando que salga aire y exhalar.

¹ La maniobra de Valsalva (por el médico italiano Antonio María Valsalva) es cualquier intento de exhalar aire con la glotis cerrada o con la boca y la nariz cerradas; tiene como resultado un notable aumento de la presión dentro del espacio interior de las vías respiratorias y espacios conectados con ellas, tales como las trompas de eustaquio y el oído medio [5].

Este dolor era pasajero, la presión en el oído después de un rato se igualaba con la de la profundidad a la que estaban, por lo que no se prestó mucha atención en ese tiempo. En una versión mejorada de su campana, Halley llegó a estar más de 4 horas sumergido a 20 metros [3].

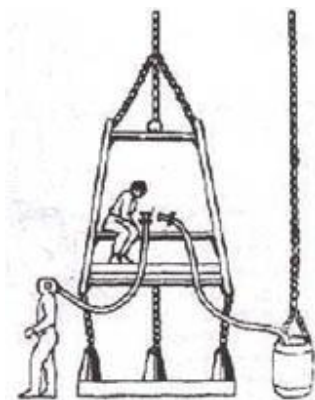


Fig. 5.4. Campana de Edmund Halley en los 90's del siglo XVII [3].

A finales del siglo XVIII, John Smeaton, ingeniero estadounidense, desarrolla la primera bomba para permitir el intercambio de aire fresco en las campanas de buceo.

Durante el siglo XIX se utilizaron campanas de buceo, las cuales fueron mejorándose con nuevos materiales tanto para su construcción como para la exploración, se mejoraron las bombas para intercambiar aire, se hicieron más cómodas para el buzo, etc. El material al principio era de madera, al final era de acero [3]. Se utilizaba vidrio en áreas donde se tuviera visibilidad para poder explorar, véase la figura 5.5.

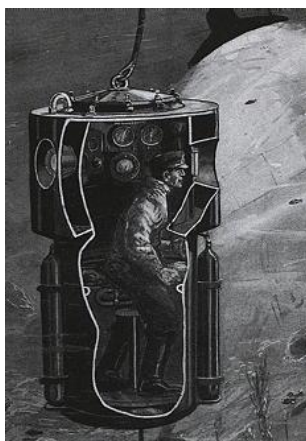


Fig. 5.5. Campana de buceo de acero. El visor es de vidrio [3].

Cabe destacar que mientras se utilizaban las campanas de buceo, se desarrollaban los primeros trajes para bucear. Estos trajes eran una modificación de las campanas de buceo con las mismas funciones, solo que como su nombre lo indica, era un traje que se ponía el buzo, no era un “lugar” donde se metía el buzo. Con estos trajes el buzo podía tener más interacción con la exploración del mar, haciéndolo un equipo más cómodo y dando un poco más de libertad al buzo.

John Letbridge desarrolla uno de los primeros trajes para bucear en 1715. Era un barril cubierto de piel, tenía un cristal para poder ver [4]. Se maniobraba igual que las campanas, desde un barco, era guiada con cadenas o cuerdas a través del océano como se muestra en la figura 5.6.

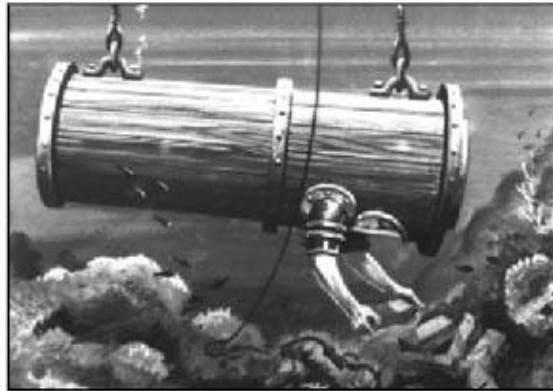


Fig.5.6. Traje de John Letbridge en 1715 [4].

En el año de 1865, dos franceses, Rouquayrol y Denayrouse, inventaron el primer aparato para respirar de circuito abierto. El circuito abierto es cuando lo que se exhala se desecha alrededor. Utilizaron un envase de acero y una válvula conectada a una boquilla. Este sistema se podía igualar con la presión que había a la profundidad donde se encontrara la persona. Al poder igualar las presiones el usuario podía respirar fácilmente, sin ningún esfuerzo ni complicación el aire contenido en la botella. Esto permitió a los buzos llegar mayor profundidad, pero también aparecieron las enfermedades por descompresión que hasta entonces eran desconocidas, causadas por respirar aire contenido en dichas botellas [4].

Las enfermedades por descompresión se explican en el capítulo 4.4.

En 1923, los alemanes Hans Neufeldt y Karl Kuhnke crearon un traje de buceo en forma de armadura, figura 5.7, el aire se obtenía de la superficie, lo que evitaban las enfermedades por descompresión, como con las campanas y trajes con intercambio de aire de la superficie, puesto que el aire no estaba sometido a ninguna presión. Con este traje se podía descender 160 metros pero su diseño limitaba los movimientos del buzo y al tener estas limitaciones no se podían realizar bien las exploraciones ni tener interacción con otros objetos [4].

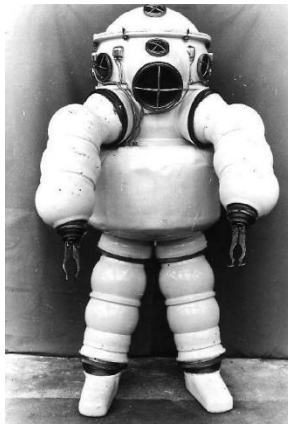


Fig. 5.7. Traje creado por Hans Neufeldt y Karl Kuhnke en 1923 [4].

De regreso al año 1823, en Estados Unidos, los operadores de salvamento en el cuerpo de bomberos, Charles y John Deane, patentaron una máscara para no respirar el humo en los incendios, la cuál era utilizada por los bomberos. En 1828 la máscara se desarrolló junto con un traje para buceo. Años más tarde, en 1836, los hermanos realizan un manual de buceo, posiblemente el primero. Este manual detallaba el correcto uso de la máscara y cómo se debía utilizar en el agua [5].

El primer traje práctico fue el de Augustus Siebes el cual se visualiza en la figura 5.8. Con algunas modificaciones al traje de los hermanos Deanes, este traje es el antecesor del “MK V”, que fue un traje utilizado por la marina en los Estados Unidos de 1916 a 1984[5].



Fig. 5.8. Traje de Augustus Siebes [5].

Este tipo de diseño se utilizó mucho en trabajos donde los buzos tenían que estar debajo del agua alrededor de 6 o 7 horas. Todos los buzos que estaban ese tiempo presentaban síntomas de reumatismo y frío. No se prestó mucha atención a esos síntomas, pero luego se darían cuenta de que no era simplemente reumatismo, era algo mucho más grave que después cobró mucha importancia en el buceo pues aparecía las enfermedades por descompresión, causante de numerosas bajas.

Con el desarrollo de la tecnología, aparecieron los *Caissons*, que quiere decir “cajones” en francés. Eran cámaras para que los buzos pudieran trabajar en seco. Dentro de estos cuartos había una bomba que los proveía de aire y sacaba el agua, por lo que los buzos podían trabajar. Estos cajones se utilizaban para la construcción de túneles o puentes y podían flotar a la altura que fuera necesaria [5].

5.2. Equipo SCUBA

La tecnología de los hermanos Deanes, de August Siebe y de otros inventores se utilizó bastante tiempo, aproximadamente 50 años. La principal desventaja que había con estos diseños era la poca movilidad del buzo, ya que el aire se proveía de la superficie y se necesitaban mangueras. La mejor solución a este problema y que no presentara lesiones al usarlo era un aparato para respirar debajo del agua, en inglés, *Self-Contained Underwater Breathing Apparatus (SCUBA)*, que durante años fue una solución puramente teórica ya que no se contaba con envases ni bombas adecuadas para la alta presión que el aire necesitaba. El buceo se fue desarrollando gradualmente basándose en tres sistemas:

- Circuito Abierto SCUBA, lo que se exhala es desechado alrededor.
- Circuito Cerrado SCUBA, el oxígeno es filtrado y recirculado.
- Circuito Semi-Cerrado SCUBA, combina características de los dos anteriores.

En el circuito abierto SCUBA, el aire es inhalado de un cilindro y al ser exhalado se desecha alrededor del buzo.

El primer componente de un aparato con circuito abierto fue el regulador de demanda.

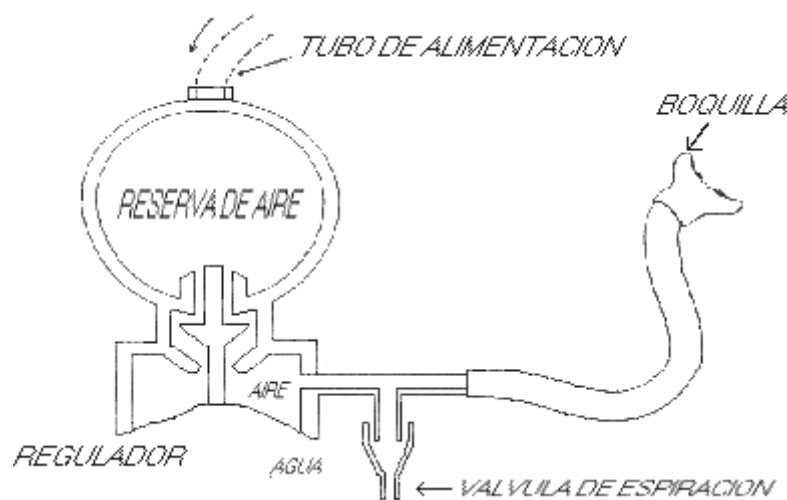


Fig. 5.9. Principio de funcionamiento del regulador de demanda de Rouquayrol [6]

En 1866, Rouquayrol diseño y patentó este regulador, el cual permitía ajustar el flujo de aire a las necesidades del buzo. Pero debido a la insuficiencia de los tanques de retener la presión que requerían, este regulador (figura 5.9) fue utilizado únicamente en la superficie; tardarían más de 60 años en poderse utilizar [6].

En 1933, un comandante francés de la Marina de apellido LePrieur, construye un SCUBA circuito abierto únicamente utilizando un tanque de aire comprimido. La desventaja de este equipo fue la falta de un regulador porque el aire no duraba mucho tiempo, lo que hizo realmente limitado el uso de este sistema.

Mientras Alemania sitiaba a Francia, Jacques Yves Cousteau y Emile Gagnan desarrollaban el Agua-Lung, el primer aparato efectivo para poder bucear. Constaba de un regulador que aguantaba tanques con bastante presión para el aire comprimido. El Agua-Lung, figura 5.10, fue la culminación de 100 años de trabajo, incluyendo desarrollos como el de LePrieur, Rouquayrol y Fleuss. Cousteau se llegó a sumergir a 180 pies, lo que hizo del Aqua-Lung un dispositivo comercial rápidamente. En la actualidad este es el dispositivo que se utiliza y lleva más de 50 años sin hacerle modificación alguna [5].

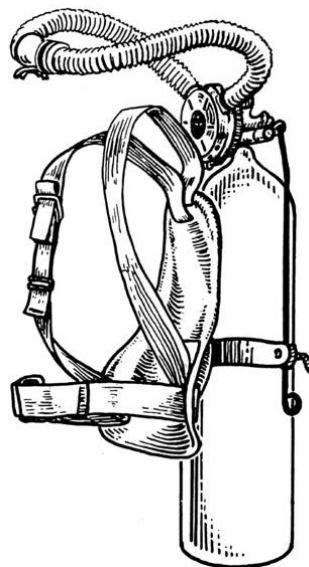


Fig.5.10 Aqua-Lung [5].

Por la gran libertad de movimiento que permite este sistema, el SCUBA ha beneficiado tanto a deportistas como a investigadores en diversas áreas, y ha permitido que se desarrolle mucho en la industria y en el comercio.

El circuito cerrado SCUBA o el Circuito Reciclador, contiene un tanque de 100% oxígeno y también utiliza un filtro químico que remueve el CO₂. El oxígeno es el gas que recircula en éste aparato. Una de las características de éste sistema es que no suelta burbujas ya que va regenerando el aire utilizado y el CO₂ se va filtrando para poder tener otra vez aire para respirar. Este tipo de sistemas se utiliza cuando en las inmersiones las burbujas pueden dañar estructuras geológicas como cavernas, o también cuando se bucea con animales que marcan su territorio con burbujas, como son las ballenas. Este sistema casi no se utiliza en buceo recreativo por su alto costo de mantenimiento y adquisición.

La desventaja de este sistema es que utiliza oxígeno puro, y este gas a profundidades de más de 40 metros empieza a volverse tóxico. Cuando se dieron cuenta de esta toxicidad, durante la segunda guerra mundial, se crearon unas tablas relacionadas con la profundidad y el tiempo que se podía estar sumergido [5].

5.3. Leyes Físicas

El cuerpo humano no es una masa uniforme porque los tejidos están conformados en su mayoría por agua y son idealmente incompresibles. La presencia de cavidades (craneana, torácica, abdominal, etc.), y el comportamiento físico particular de los fluidos en fase gaseosa, determinan los límites de presión que el cuerpo humano puede soportar.

El ser humano, en la superficie terrestre, es apto para sobrevivir con las condiciones atmosféricas; en el buceo, por estar en un ambiente submarino, se deben tener en cuenta algunas leyes físicas como la de los gases y la presión [5].

5.3.1. Presión

La presión es la fuerza que actúa sobre la materia en un área determinada [7]. En el buceo se utilizan unidades tanto inglesas como las del sistema internacional: psi y N/cm^2 respectivamente. La presión por debajo del agua es el resultado del peso del agua por encima del buzo y el peso de la atmósfera sobre el agua. Un concepto que se tiene que tener bien claro es que cualquier buzo, a cualquier profundidad, debe de equilibrar la presión del cuerpo con la presión que exista a esa profundidad. El cuerpo humano tiene un correcto funcionamiento únicamente cuando la diferencia de presiones que hay dentro del cuerpo y la que hay a su alrededor es mínima, casi nula. El correcto funcionamiento del cuerpo humano se refiere a que los órganos ejecuten sus funciones como debe ser.

En el buceo la presión atmosférica es importante y cada 10 metros de profundidad es una unidad de Atmósfera más y se identifica con la palabra atmósfera absoluta (ata). Por ejemplo, a nivel del mar estaríamos a 1 [ata], 10 metros debajo del agua estaríamos a 2 [ata] y así sucesivamente. Ejemplos en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Relación de presión absoluta, presión atmosférica y profundidad [7].

Profundidad *	Presión atmosférica	Presión absoluta
0	1 Atmósfera	1 ata
10 m.b.n.m.	+ una Atmósfera	2 ata
20 m.b.n.m.	+ una Atmósfera	3 ata
30 m.b.n.m.	+ una Atmósfera	4 ata

*m.b.n.m. (metros bajo el nivel del mar)

5.3.2. Leyes de los Gases

Ya se vio con anterioridad la ley de la presión. Los gases tienen mucha relación con la presión por lo que para seguir con las leyes físicas que intervienen en el buceo, veremos a continuación las leyes de los gases.

Conocer el comportamiento de los gases que se utilizan en el buceo es de vital importancia para los buzos ya que si no se conoce el comportamiento de los gases se pueden sufrir accidentes como la formación de burbujas que pueden acabar en una embolia provocando así la pérdida de la vida [8].

El gas más utilizado por los buzos es el aire atmosférico, su composición es la que se muestra en la Tabla 5.2:

Tabla 5.2. Composición química del aire [7].

Componente	Porcentaje por volumen	Concentración (ppm)
Nitrógeno	78.084	-
Oxígeno	20.9476	-
Argón	0.934	-
Dióxido de carbono	0.038	380
Neón	0.00123	18.18
Helio	0.0004	5.24
Kriptón	0.00005	1.14
Xenón	0.000006	0.08
Hidrógeno	0.01	0.5
Metano	0.0002	2.0
Óxido Nitroso	0.00005	0.5

Si la mezcla de aire no es así, es que tiene contaminantes y estos contaminantes son partículas nocivas para la salud al respirarla provocando una toxicidad. Para evitar todos esos contaminantes que afectarían al buzo es necesario que el compresor tenga mantenimiento y verificar el proceso de llenado de los tanques [8].

Para la mayoría de los cálculos se toma a la mezcla de aire como 79% nitrógeno y 21% oxígeno.

El comportamiento de los gases depende de tres factores: la temperatura, presión y volumen. La teoría dinámica de los gases nos dice que si se ve afectado uno de estos factores, por consecuencia uno o los otros dos factores igual se verán afectados [7].

En el buceo se necesita saber cómo la presión va a afectar los gases en su traje y su organismo (en este caso los pulmones) mientras asciende o desciende. El buzo debe

de ser capaz de determinar el aire que debe de suministrar a cierta profundidad y también de poder leer los instrumentos que miden la presión [8].

Una ley muy importante en el buceo es la Ley de Boyle, que dice: “A temperatura constante, la presión absoluta y el volumen del gas son inversamente proporcional” [7]. Al haber un incremento de presión el volumen se reduce, por el contrario, si se reduce la presión el volumen aumenta.

La ecuación es la que se muestra en ecuación 5.1.

$$C = P \times V \quad \dots\dots\dots(5.1)$$

Dónde: C= cte.,

P= Presión y

V= Volumen

Esta ley se puede expresar también como se expresa en ecuación 5.2.

$$P_1V_1 = P_2V_2 \quad \dots\dots\dots(5.2)$$

Dónde: P₁=Presión inicial,

P₂=Presión final,

V₁=Volumen inicial,

V₂=Volumen final

La gráfica de la ley de Boyle sería como la figura 5.11.

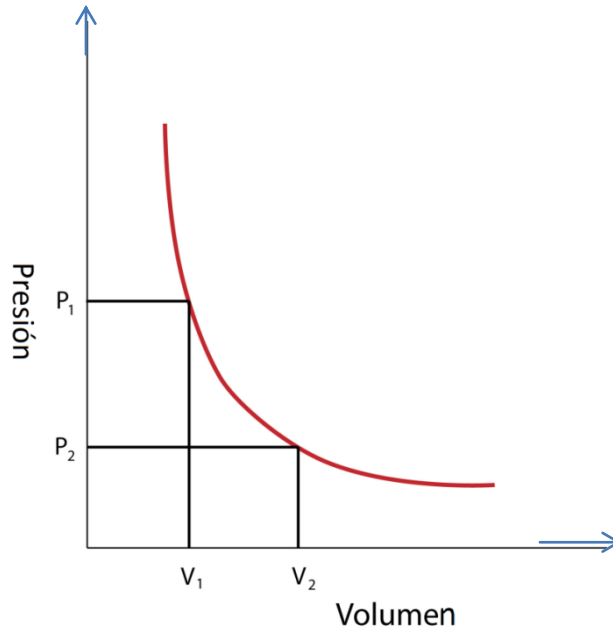


Fig. 5.11 Gráfica de la Ley de Boyle [7].

Otra ley importante es la Ley de Charles/Gay-Lussac. En esta ley la temperatura afecta de forma importante a los elementos que están soportando presión y cambios de temperatura, por ejemplo los tanques, que pueden sufrir cambios. La ley dice: “A presión constante, el volumen de un gas es directamente proporcional al cambio de temperatura” [7]. Esto es, si la temperatura aumenta el volumen aumenta; si la temperatura disminuye el volumen disminuye.

La ecuación es la que se muestra con la ecuación 5.3 y ecuación 5.4.

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \dots\dots\dots(5.3)$$

Dónde: T₁=Temperatura inicial,

T₂=Temperatura final,

V₁=Volumen inicial,

V₂=Volumen final

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \dots\dots\dots(5.4)$$

Dónde: P₁=Presión inicial,

P₂=Presión final,

V₁=Volumen inicial,

V₂=Volumen final

Un ejemplo gráfico se muestra en la figura 5.12.

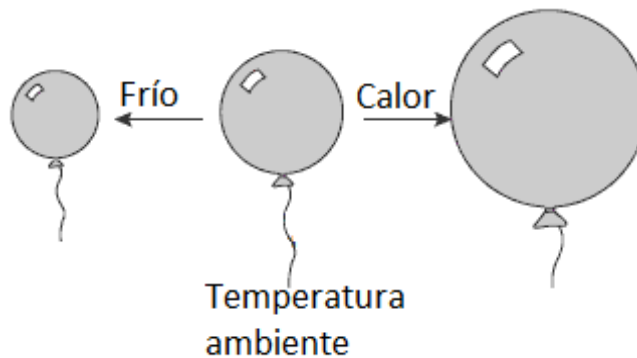


Fig.5.12. Ejemplo de la Ley de Charles/Gay Lussac [7]

Y por último veremos la Ley General de los Gases, que nos dice que afectando un factor (Presión, Temperatura o Volumen) se afecta el otro o los otros dos. Esta ley combina las dos leyes mencionadas anteriormente.

La ecuación para expresar esta ley es ecuación 5.5.

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \dots\dots\dots(5.5)$$

Dónde: T₁=Temperatura inicial,

T₂=Temperatura final,

V₁=Volumen inicial,

V₂=Volumen final,

P₁=Presión inicial,

P₂=Presión final

En el buceo recreativo se utiliza básicamente aire atmosférico comprimido, aunque hay ocasiones que las inmersiones son más técnicas y se requiere estar más tiempo sumergido, por lo que se utilizan mezclas de gases. Por ejemplo, el oxígeno se podría utilizar porque es el único que nos sirve para sobrevivir, pero puede ser peligroso mientras lo respiremos más tiempo a grandes profundidades ya que se vuelve tóxico. Para tener un poco de control sobre esto existen otras leyes que a continuación se mencionan.

La Ley de Dalton dice: “La presión total de una mezcla de gases es igual a la suma de las presiones de cada uno de los diferentes gases que ejercería cada uno de ellos si sólo uno ocupase todo el volumen de la mezcla” [7].

La ecuación para expresar esta ley ecuación 5.6.

$$P_{Total} = p p_A + p p_B + p p_C + \dots \dots\dots(5.6)$$

Donde A, B y C son gases y por lo tanto se expresa como en la ecuación 5.7:

$$pp_A = \frac{P_{Total} \times \%Vol_A}{1.00} \dots\dots\dots(5.7)$$

Otro efecto físico de las presiones parciales y su actividad cinética es la difusión gaseosa: el proceso de combinación entre los gases lo que ocasiona un movimiento molecular constante. Este fenómeno es importante ya que las moléculas atraviesan membranas permeables y en el cuerpo tenemos tejidos constituidos por este tipo de membranas. Si estas moléculas (gas) atraviesan esas membranas se empezarán a formar núcleos de burbujas, las cuales se explican en capítulo 4.4.

El rango de difusión gaseosa está relacionado con la diferencia en presiones parciales y es importante considerarla en la eliminación de gases que se calcula en la tabla de descompresión, de la cual hablaremos más adelante.

Cuando un gas tiene contacto con un líquido, una porción de las moléculas de ese gas entra en solución con el líquido. Se dice que este gas se disuelve en el líquido. La solubilidad es sumamente importante porque el gas se disuelve en los tejidos corporales respecto con la presión a la que se encuentre el buzo.

La solubilidad es la propiedad con que los gases tienen para disolverse. Por ejemplo, el Nitrógeno es cinco veces más soluble en la grasa que en el agua.

Un ejemplo de la solubilidad se visualiza en la figura 5.13.

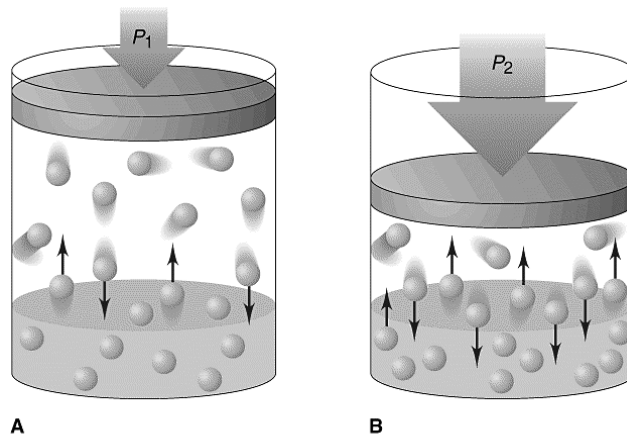


Fig. 5.13. En la imagen del lado izquierdo la presión es menor que la del lado derecho. En el lado derecho las moléculas se han disuelto por la presión [7].

Tenemos otra ley importante en el buceo que dice: “La cantidad de gas que se disuelve en un líquido a cierta temperatura es directamente proporcional a la presión parcial de este gas” [7]. Esta ley es conocida como la ley de Henry. Teniendo en cuenta que el porcentaje de la constitución del cuerpo en su mayor parte es agua, esta ley nos dice que mientras más profundo se bucee, más gas se disolverá en nuestros tejidos corporales y cuando ascendamos, el gas buscará una salida.

A nivel del mar, los tejidos corporales tienen equilibrio con el nitrógeno disuelto a la presión parcial igualada a la presión parcial del nitrógeno en los pulmones. A medida que se expone a altitud o un incremento de presión en el buceo, la presión parcial de nitrógeno en los pulmones cambia y los tejidos pierden o ganan nitrógeno para alcanzar un nuevo equilibrio con la presión del nitrógeno en los pulmones [5]. Cuando se bucea con aire, la absorción del nitrógeno ocurre cuando el buzo se expone a una presión parcial alta de nitrógeno. Cuando la presión disminuye, el nitrógeno se elimina. Esto pasa con cualquier gas inerte respirado.

La absorción consiste de diversas fases, incluyendo la transferencia de un gas inerte de los pulmones a la sangre y después de la sangre a diversos tejidos mientras fluye por el cuerpo

[6]. El gradiente para la transferencia de gas es la presión parcial entre el gas de los pulmones y la sangre y los tejidos.

El flujo de la sangre a través de los tejidos es pequeño comparado con la masa de los tejidos, pero en un periodo de tiempo el gas en el tejido provoca un equilibrio con el gas de la sangre. El rango de equilibrio con el gas de la sangre depende tanto del flujo de la sangre y las capacidades de cada tejido para absorber el gas disuelto. Por ejemplo, los tejidos grasos absorben más gas que los tejidos acuosos y por lo tanto, tomará más tiempo en absorber o eliminar el exceso de gas inerte.

La solubilidad de los gases es afectada por la temperatura, mientras más baja sea ésta, mayor es la solubilidad. Mientras la temperatura de una solución incrementa, un poco de gas disuelto deja la solución. Un ejemplo es que cuando se pone a calentar el agua, antes de hervir, las burbujas que salen es gas disuelto que deja de la solución.

Los gases que respira un buzo son disueltos en su cuerpo en proporción a la presión parcial de cada gas en la mezcla. Por la distinta solubilidad de los diferentes gases, la cantidad de un gas en particular que se disuelve, es también afectada por el tiempo que el buzo respira el gas a presiones altas. Si el buzo respira el gas demasiado tiempo, su cuerpo se saturará con el gas que esté respirando [8].

El gas disuelto en el cuerpo de un buzo permanece en solución tanto tiempo como la presión se mantenga. Sin embargo, cuando el buzo asciende el gas disuelto sale de la solución. Si tiene un ascenso controlado, el gas disuelto se va a los pulmones y lo va exhalando antes de que se acumule en el tejido en forma de burbujas. En el caso de que no tenga un ascenso controlado, se forman burbujas, lastima los tejidos u órganos y causa la enfermedad de descompresión.

En la figura 5.14 se muestra una gráfica que relaciona la profundidad, presión y atmósferas, la cual hay que tener en cuenta para saber cuáles son las condiciones de un buzo y su alrededor conociendo uno de éstos parámetros.

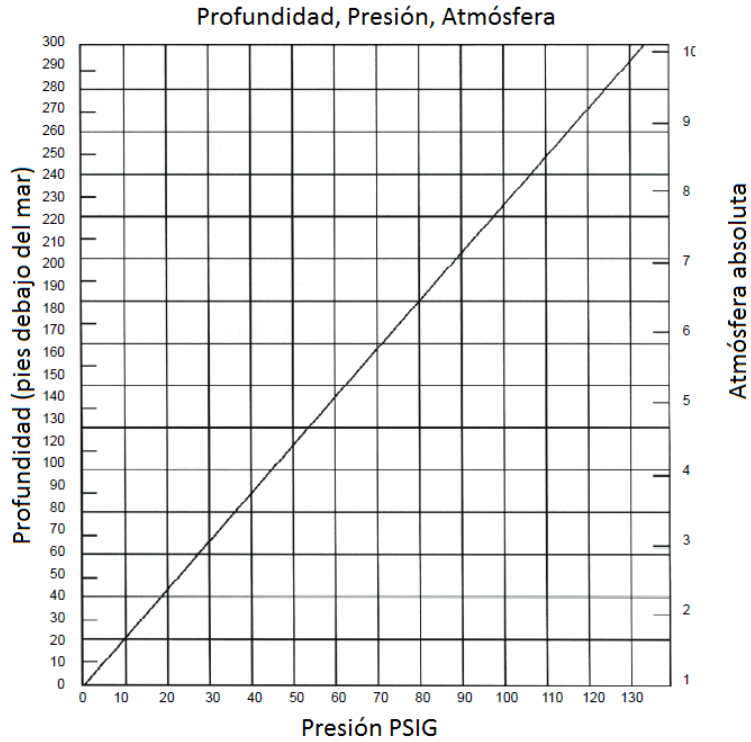


Fig. 5.14 Gráfica que muestra la relación entre Profundidad, Presión y Atmósferas [5].

5.3.3. Ley de Beer-Lambert

La ley de Beer-Lambert relaciona la intensidad de luz entrante en un medio con la intensidad saliente después de que en dicho medio se produzca absorción [7]. Esta relación se puede expresar con las siguientes ecuaciones, por ejemplo la ecuación 5.8:

$$\frac{I_1}{I_0} = 10^{-\alpha l} = 10^{-\alpha l c} = 10^{-A} \quad \dots\dots\dots(5.8)$$

Donde: I_1, I_0 son las intensidades salientes y entrantes respectivamente.

$A = \alpha l c$, es la absorbancia,

l es la longitud atravesada por la luz en el medio,

c es la concentración del absorbente en el medio,

α es el coeficiente de absorción.

Esta ley nos explica que hay una relación exponencial entre la transmisión de luz a través de una sustancia y la concentración de la sustancia, así como también entre la transmisión y la longitud del cuerpo que la luz atraviesa. Si conocemos l y α , la concentración de la sustancia puede ser deducida a partir de la cantidad de luz transmitida. Aunque esta ley no está relacionada con el buceo, nos servirá más adelante para poder tener una idea de cómo se desarrolló el circuito final.

5.4 Efectos y enfermedades en el buceo

Los efectos secundarios de la presión en el cuerpo humano son el resultado de cambios en la presión parcial de los gases en el medio respiratorio del buzo [9]. Estos efectos incluyen la saturación y la desaturación de los tejidos corporales con gas disuelto y la modificación de las funciones del cuerpo causadas por las presiones parciales anormales del gas.

En primera instancia tenemos la narcosis nitrogenica [10], que es un estado de euforia y regocijo que ocurre cuando un buzo respira una mezcla de gases con una presión parcial del nitrógeno mayor a 4 [ata].

Las causas de la narcosis nitrogenica es respirar nitrógeno a presiones parciales altas, esto causa un efecto narcótico en el sistema nervioso central que puede causar euforia e imposibilita pensar claramente al buzo. El efecto narcótico empieza a una presión parcial de aproximadamente 4 ata y se incrementa mientras mayor presión haya. A una presión de 8 ata se marca mucho el efecto narcótico del nitrógeno. A 10 [ata] el buzo puede llegar a tener alucinaciones y quedar inconsciente.

La narcosis nitrogenica depende de cada buzo [11]. Hay unos que se pueden adaptar después de repetidas ocasiones y otros no. Algunos buzos realizan inmersiones frecuentemente a 60 metros de profundidad sin ninguna dificultad. Esto lo logran realizar ya que su cuerpo se ha adaptado a eliminar más rápido el nitrógeno residual y a absorber menos nitrógeno residual.

Dentro de los síntomas de la narcosis nitrogenica pueden presentarse los siguientes:

- Pérdida de juicio y habilidades
- Falsa sensación de estar bien
- Desinterés por trabajo o seguridad
- Risas inapropiadas
- Hormigueo en labios y piernas

Olvidarse del estar en un medio acuático puede ser lo más peligroso para un buzo, pues se podría llegar a quitar el regulador de la boca o nadar a grandes profundidades sin tener en cuenta la enfermedad por descompresión o la cantidad de aire que queda en el tanque.

Hay un término que se utiliza en el buceo que es: descompresión. La descompresión es la reducción de la presión que ha estado sometido un gas o un líquido [12].

La enfermedad de descompresión es cuando la sangre y tejidos del buzo absorben nitrógeno adicional de los pulmones a cierta profundidad. Si un buzo asciende demasiado rápido, este gas en exceso se separará de la solución y formará burbujas [13]. Estas burbujas producen efectos mecánicos y bioquímicos como la pérdida de conocimiento, mareo, vértigo,

asfixia, narcosis nitrogenica, etc., que llevarán a cabo la enfermedad por descompresión o incluso la muerte.

El cuerpo humano tiene un litro de nitrógeno a nivel del mar. Todos los tejidos corporales están saturados con nitrógeno a la presión parcial igualada a la presión parcial de los alvéolos pulmonares, que es aproximadamente 0.79 [ata].

Si la presión parcial de nitrógeno cambia porque hay un cambio en la presión o en la composición de la mezcla para respirar, la presión del nitrógeno disuelto en el cuerpo tiende también a un cambio, y por lo tanto busca un equilibrio. Cantidades adicionales de nitrógeno son absorbidas o eliminadas, dependiendo del gradiente de presión parcial, hasta que se encuentra el equilibrio con el gas de los pulmones y el de los tejidos.

Como dice la Ley de Henry, descrita en el capítulo 5.3 de Leyes físicas, la cantidad de gas disuelto en un líquido es directamente proporcional a la presión parcial del gas. Si un litro de gas inerte es absorbido a la presión de una atmósfera, entonces dos litros serán absorbidos a la presión de dos atmósferas y así sucesivamente.

La secuencia de eventos en el proceso de saturación puede ejemplificarse en lo que pasa en el cuerpo de un buzo que se sumerge rápidamente de la superficie a 30 metros debajo del nivel del mar [13]. Al inicio la presión parcial del nitrógeno en su sangre y tejidos está a 0.8 [ata], que es la presión dentro del cuerpo a nivel del mar. Recordemos que la presión atmosférica es de 1 atmósfera y el cuerpo busca estar en equilibrio con ésta presión. Cuando el buzo alcanza los 30 m.b.n.m. la presión del nitrógeno alveolar en sus pulmones será de 0.8×4 [ata] = 3.2 [ata], mientras que la sangre y tejidos permanece a 0.8 [ata]. El gradiente de la presión parcial entre el aire alveolar y la sangre y tejidos es de $3.2 - 0.8 = 2.4$ [ata] [14].

Este gradiente es la fuerza que hace que las moléculas de nitrógeno se muevan por difusión de un lugar a otro. Hay que tener en cuenta 10 factores del buzo a 30 m.b.n.m.

1. Mientras la sangre pasa a través de los capilares alveolares, las moléculas de nitrógeno se mueven del aire alveolar a la sangre. Cuando la sangre deja los pulmones, ha alcanzado el equilibrio con la nueva presión alveolar. Ahora tiene una presión parcial de 3.2 ata y contiene cuatro veces el nitrógeno que tenía al principio. Cuando esta

sangre alcanza los tejidos, hay un gradiente similar y las moléculas de nitrógeno que se mueven de la sangre a los tejidos hasta que el equilibrio se logra.

2. El volumen de la sangre de un tejido es relativamente muy pequeño comparado con el volumen del tejido y la sangre puede solo llevar una pequeña cantidad de nitrógeno. Es por esto que el volumen de la sangre que alcanza un tejido en poco tiempo pierde el exceso de nitrógeno con el tejido sin incrementar la presión del nitrógeno en el tejido.
3. Cuando la sangre deja el tejido, la presión de la sangre venosa es igual a la presión del nitrógeno del nuevo tejido. Cuando esta sangre pasa a través de los pulmones, vuelve a equilibrarse a 3.2 [ata].
4. Cuando la sangre regresa al tejido, vuelve a perder nitrógeno hasta que el equilibrio se alcanza.
5. Mientras la presión del nitrógeno en el tejido aumenta, el gradiente de sangre-tejido disminuye, haciendo más lento el rango de intercambio de nitrógeno. Cada cantidad de sangre que alcanza el tejido le da un poco de nitrógeno que incrementa la presión parcial del tejido hasta llegar a la saturación. En éste caso es 3.2 [ata] de nitrógeno.
6. Los tejidos con mayor flujo sanguíneo tienden a saturarse más rápido que los que tienen un flujo menor.
7. El nitrógeno se disuelve cinco veces más en la grasa que en el agua. Los tejidos grasos tienen poco flujo sanguíneo y se tardan más en saturarse que los tejidos no adiposos.
8. Si a 30 m.b.n.m. el buzo se mantiene durante un periodo de tiempo prolongado, en que sus tejidos se empiecen a saturar, los primeros tejidos que se saturan son los no adiposos y al final los adiposos.
9. Si se alcanza la saturación a 30 m.b.n.m el cuerpo del buzo contendría cuatro veces más nitrógeno del que tenía en la superficie. La mayor parte del nitrógeno estaría en los tejidos adiposos.
10. El tiempo que se necesita para una saturación es el mismo a cualquier profundidad.

Este proceso descrito con anterioridad se ejemplifica en la figura 5.15.

Saturación de tejidos

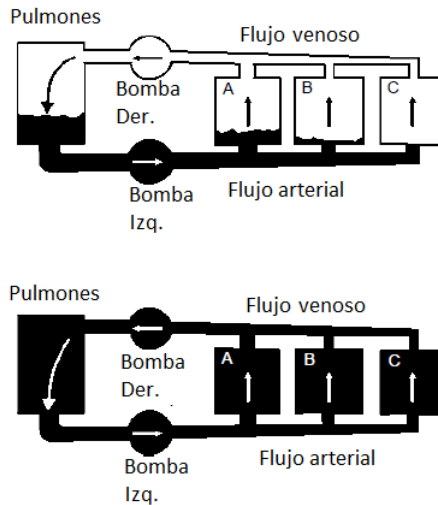


Fig. 5.15. Saturación de los tejidos [15]

Hay dos tipos de burbujas, las que se forman en los tejidos (autóctonas) y las que están en el flujo sanguíneo (circulantes). Las autóctonas pueden bloquear las terminales nerviosas, causar hemorragias e incrementar la presión en el tejido impidiéndole el flujo sanguíneo. Estas burbujas son las principales en el daño de la columna vertebral, en el sistema músculo esquelético y en el oído interno [16].

Las burbujas circulantes pueden llegar a bloquear las arterias provocando una obstrucción para el paso de la sangre oxigenada. Esta obstrucción puede producir una hipoxia a nivel tisular y así provocar la muerte.

Las burbujas que llegan a los pulmones bloquean el paso de la sangre causando un edema pulmonar y reduciendo el intercambio gaseoso.

Las burbujas que lleguen a las arterias podrían causar una embolia cerebral.

5.5 Características del equipo SCUBA

Pincipio de operación: Es un sistema de circuito abierto de demanda. En un circuito abierto lo que se exhala se desecha alrededor. La válvula de demanda se refiere al regulador,

cuando el buzo necesita aire, simplemente aspira y sale el aire que el buzo demande, no sale más. El aire está en un cilindro con su respectiva válvula [17].

Equipo necesario mostrado en la figura 5.16.:

- Circuito abierto SCUBA con manómetro sumergible
- Chaleco compensador de flotabilidad
- Lastre (si es requerido)
- Cuchillo para bucear
- Máscara con *snorkel*
- Aletas
- Reloj
- Profundímetro
- *Traje de neopreno
- *Guantes y botas de neopreno
- *Octopus

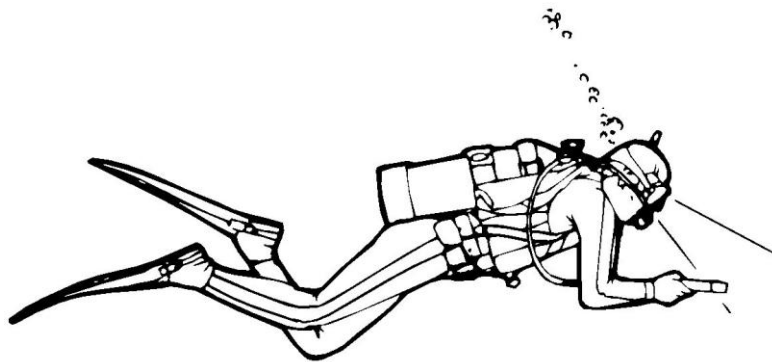


Fig. 5.16. Equipo SCUBA [5]

5.6. Descompresión

La teoría de la descompresión dice que cuando un buzo está descendiendo, la presión parcial de nitrógeno en sus pulmones está por arriba de la presión parcial del nitrógeno disuelto en sus tejidos. Ésta diferencia de presión hace que el nitrógeno sea

transportado de los pulmones a los tejidos a través del flujo sanguíneo [18]. El proceso de saturación se detendrá cuando se alcance el equilibrio de presiones recordando que cada tejido tiene diferente tiempo de absorción del nitrógeno. Un tejido con mucho flujo sanguíneo, como el cerebro, entrará en equilibrio antes que un tejido con bajo flujo sanguíneo, como un tendón o músculo.

Cuando el buzo empieza a ascender, el proceso se revierte. La presión parcial del nitrógeno en los tejidos excede la que tienen los pulmones. Durante el ascenso, el nitrógeno es transportado de los tejidos a los pulmones mediante la circulación sanguínea. El ascenso debe ser controlado cuidadosamente para permitir que se equilibre la presión del nitrógeno de los tejidos con la de los pulmones y no con la presión del ambiente. En caso de equilibrarse con la presión a la que se encuentre el buzo, habría más riesgo de que se formen burbujas o núcleos de burbujas. Mientras más presión parcial del nitrógeno exceda la presión del ambiente, más posibilidades habrá de que se formen burbujas en tejidos y sangre causando la enfermedad de descompresión.

El ascenso controlado requiere de paradas de descompresión a algunos metros debajo del nivel del mar por cierto tiempo [5].

El nitrógeno residual es el exceso de gas nitrógeno disuelto en los tejidos del buzo después de bucear. Este exceso se elimina gradualmente en el intervalo de superficie, que es el tiempo que el buzo permanece en la superficie después de una inmersión antes de realizar otra [19]. Si se realiza una segunda inmersión antes de que se elimine todo el nitrógeno residual, se debe de considerar este exceso al planear el buceo repetitivo.

El tiempo de nitrógeno residual es el tiempo que se debe de agregar al tiempo de buceo para compensar el nitrógeno en solución dentro de los tejidos del buzo [20].

A través de estudios, cálculos y experimentación en humanos y animales, se hizo posible la creación de las tablas de descompresión (Anexo 1). Estas tablas tienen información muy precisa de la relación profundidad-tiempo que se puede estar sumergido, pero tienden a bajar su efectividad mientras se bucea a más profundidad y el tiempo de buceo se incrementa. Esto se debe a que las tablas se realizaron para buceo

deportivo y recreativo y no buceo profundo, por lo que las tablas son seguras en los límites de buceo deportivo (40 metros de profundidad). En el buceo profundo se utilizan mezclas de gases y otras tablas.

Un investigador que colaboró con las tablas de descompresión fue el Dr. Albert A. Bühlmann [21]. Creó un algoritmo de descompresión que describía la manera en que los gases inertes entran y salen del cuerpo mientras la presión cambia [22]. Sus investigaciones las realizó en el Laboratorio de Fisiología Hiperbárica en la Universidad-Hospital de Zürich, Suiza. Los resultados de su investigación se encuentran en el libro “Descompresión- Enfermedad de Descompresión” y a partir de estos resultados es que las tablas se hicieron y las computadoras de buceo están hechas con este algoritmo [23, 24].

Un ejemplo de cómo se planea una inmersión se ejemplifica con la figura 5.17, y el uso de las tablas se explica a continuación:

Si la primera bajada es a una profundidad $P=60$ [ft] durante un tiempo de buceo $TB=30$ [min] vamos a salir en el primer Grupo $1^{\circ} G=“F”$. Hacemos un intervalo de superficie $T.S.=105$ [min]. Entramos a la segunda inmersión en el segundo grupo $2^{\circ} G=“D”$ a menos profundidad, ahora la profundidad $P=40$ [ft] podremos tomar un tiempo de buceo $TB=93$ [min]. Tomando en cuenta el tiempo de nitrógeno residual $TNR=37$ [min] tenemos un tiempo total de fondo $TTF=130$ [min]. Saldremos en el tercer grupo $3^{\circ} G=“J”$ y por seguridad hacemos una parada de descompresión $PD=5$ [min] a 5 metros bajo el nivel del mar.

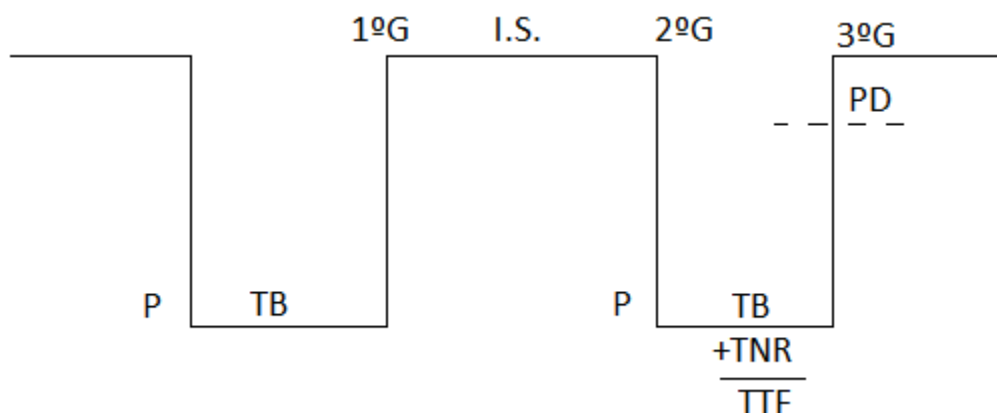


Fig.5.17. Ejemplo de planeación de buceo

Como se puede apreciar, el nitrógeno residual es sumamente importante en el buceo, ya que es el gas inerte que puede llevar al buzo a la muerte si no se tiene conocimiento previo de la parte teórica que tiene el buceo. Una mala práctica de buceo es muy riesgosa para las personas sin conocimiento, es por eso que cuando se quiere bucear se debe de tener una certificación o bucear con alguien certificado para evitar accidentes o enfermedades por descompresión.

Un instrumento que pudiera medir la saturación de nitrógeno residual sería sumamente importante dentro del equipo de seguridad de un buzo, ya que se podría saber con certeza la cantidad de nitrógeno residual que tiene acumulado en la sangre y tejidos. Teniendo estos datos se haría del buceo una deporte más seguro y se aprovecharía mejor los tiempos, pues podríamos hacer una planeación del buceo más precisa que las que se realizan con las tablas para bucear, que son cálculos estadísticos.

Un instrumento así se puede desarrollar utilizando la ley de Beer-Lambert que trata de la fotoespectrometría. Sería un sensor no invasivo que pudiera determinar la concentración de nitrógeno permitiendo pasar cierto tipo de luz, en nuestro caso, la infrarroja. Esta luz tiene una longitud de onda muy grande (940 [nm]) y es fácil realizar mediciones con ésta luz. Así es como se podría desarrollar un instrumento que pudiera medir la saturación del gas nitrógeno en la sangre.

▣

6. Metodología

En este apartado se realizaron algunas entrevistas para obtener conocimiento y opiniones de personas con mucha experiencia en el buceo acerca del dispositivo que se pretende realizar para ver si era factible y una buena oportunidad de llevar a cabo dicho proyecto.

Para realizar el proyecto físicamente se tuvo que hacer un análisis de componentes, los que más convenían, para poder tener un prototipo final. Se investigó también de los dispositivos, sensores no invasivos, existentes en el mercado para medir gases en el cuerpo para así tener conocimiento del funcionamiento de dichos dispositivos.

6.1 Entrevistas

Para realizar las entrevistas se tuvo que informar a los entrevistados del proyecto que se quiere lograr, gente con conocimiento y experiencia en el buceo y de los riesgos que existen en el si no se realiza una buena práctica, se les explicó sobre el funcionamiento teórico del dispositivo que se pretende generar y en qué información se basa el desarrollo.

Estas entrevistas sirven para ver si se puede llevar a cabo el desarrollo con buenos resultados y qué oportunidades se tendrían si es que se logra realizar el proyecto.

El entrevistador es Jorge Noguera y aparece en las entrevistas con las iniciales de su nombre y apellido.

Entrevista a Carlos Barrera

Maestro de Instructores (MDI), Instructor Estrella de Oro (3 estrellas), Ejerce en la Alberca Olímpica Francisco Márquez (AOFM), más de 30 años buceando

J.N.: ¿Qué opina de un dispositivo que midiera el nitrógeno residual?

C.B.: Extraordinario. Sería un dispositivo que no existe en la actualidad y permitiría saber con certeza la cantidad de nitrógeno residual que hay en el cuerpo después del buceo, haciendo del buceo una actividad más segura.

J.N.: ¿Cree Ud. que un dispositivo así sería indispensable para la comunidad de buzos?

C.B.: Indispensable no, pero sería de gran utilidad para comparar valores que tenemos con las tablas de buceo o las computadoras, que basadas en algoritmos dan una cantidad aproximada de lo que tu medirías con más precisión.

J.N.: ¿En qué casos cree que se utilizaría un dispositivo así?

C.B.: En buceos profundos y/o prolongados, también en las cámaras hiperbáricas. En el buceo industrial muchas personas son metidas en cámaras hiperbáricas por seguridad y prevención de enfermedades por descompresión, con un dispositivo así no sería necesario meter a todos, ya que se sabría quién necesita y quién no el tratamiento en una cámara hiperbárica. Como tú lo mencionaste en un principio, cada persona tiene diferente metabolismo

Entrevista a Omar Carreto

Instructor Estrella de Oro (3 estrellas), ejerce en la AOFM, más de 20 años en el buceo.

J.N.: ¿Qué opina de un dispositivo para medir el nitrógeno residual?

O.C.: Suena bastante interesante. El nitrógeno es de los gases más peligrosos cuando se bucea. Si no se tiene control o se ignora de lo que sucede cuando uno está buceando es cuando hay muchos accidentes. Mucha gente, sin tener conocimiento del buceo, ha sufrido de enfermedades por descompresión. Este instrumento se podría utilizar como un dispositivo de seguridad.

J.N.: ¿Usted ocuparía este instrumento?

O.C. Si, lo ocuparía para tener una referencia real. Cuando yo buceo utilizo las tablas y mi computadora de buceo, que ambas están basadas en algoritmos. Siempre que buceo comparo las tablas con la computadora de buceo.

Además este instrumento lo utilizaría para saber la saturación exacta que tengo.

J.N.: ¿Cómo utilizaría este instrumento?

O.C.: Sería un equipo adicional. El cual brindaría mayor seguridad para todo aquel que lo ocupara.

J.N.: ¿Confía plenamente en las computadoras de buceo?

O.C. No, en especial en esta parte, que es la descompresión. Estas computadoras están basadas en algoritmos a comparación del instrumento que te daría una saturación a tiempo real. Siempre que utilizo las tablas y la computadora, nunca llego a los límites máximos por seguridad.

Entrevista a Vania Ruiz

Buza Intermedia

J.N. ¿Qué opina de un instrumento para medir nitrógeno residual?

V.R. Estaría bastante interesante. Excelente para tener mayor seguridad en el buceo.

J.N. ¿Ocuparía este instrumento?

V.R. Por supuesto que sí, sería un accesorio complementario para el equipo de buceo y además sería un accesorio para la seguridad del usuario. Ayudaría a planear mejor las inmersiones con menos riesgos de sufrir una enfermedad por descompresión lo cual es la mayor ventaja que le veo a éste instrumento.

Otro punto importante que determinaría si lo ocuparía sería el costo, en caso de que llegara a ser comercial. Si fuera accesible, ten la seguridad de que lo compraba y hasta lo recomendaba a otros buzos.

J.N. ¿Qué opina de las computadoras de buceo?

V.R. Son muy buenas y utilizadas en la actualidad por casi todos los buzos. Su funcionamiento está basado en algoritmos, por lo que son resultados estadísticos y al ser estadísticos su uso se restringe. El instrumento que estas desarrollando sería lo ideal para obtener valores exactos de la saturación de nitrógeno en el cuerpo.

J.N. ¿Qué uso le daría a este instrumento?

V.R. Un uso para seguridad. Sería muy bueno que se utilizara en buceo deportivo que es donde se bucea con aire y es cuando mayor nitrógeno residual hay. Mucha gente no respeta las tablas y arriesga su salud. Un instrumento así prevendría muchas enfermedades por mala praxis de las tablas o computadoras de buceo e incluso hasta podría salvar vidas.

Entrevista a Dra. Jena Rosado M.

Instructora DAN, ASHI y NAUI, Oficial Medico de Buceo NOAA, Directora de Seguridad
Hiperbárica

J.N. ¿Qué opina de un instrumento que pudiera medir el nitrógeno residual?

J.R. Sería un instrumento magnífico, ideal para mi trabajo.

J.N. ¿Ocuparía usted este instrumento?

J.R. Absolutamente, lo ocuparía en las cámaras hiperbáricas y en las salidas de buceo.

J.N. ¿Qué opina de las actuales computadoras de buceo y de las tablas?

J.R. Las computadoras de buceo están basadas en los algoritmos de las tablas de buceo. Las computadoras se han actualizado pero los algoritmos no, vienen siendo los que se utilizan desde hace mucho. Las tablas tampoco se han desarrollado pero han servido en la medicina hiperbárica y en el buceo.

J.N. ¿Qué uso le daría a este instrumento?

J.R. En las cámaras hiperbáricas me ayudaría mucho para saber cuándo el paciente está recuperado totalmente y saber cómo va disminuyendo la cantidad de nitrógeno residual en la sangre. En el buceo podría tener una lectura real de la cantidad de nitrógeno residual y así podría planificar mejor el buceo y no poner en riesgo mi seguridad.

6.2. Importancia del nitrógeno residual en la sangre

Como se comprueba con las entrevistas realizadas, la medición del nitrógeno residual que se almacena en los tejidos y sangre después de practicar el buceo tiene una importancia en el ejercicio del buceo por lo que es conveniente identificar las herramientas para hacer tal medición con base en la teoría ya analizada en el marco teórico.

La fotospectrometría se basa en la absorción de la longitud de onda en una sustancia [25]. Para este trabajo se podría usar la fotospetrometría en la sangre y otros tejidos con nitrógeno residual. Nos interesa saber la cantidad de nitrógeno que hay acumulada en la sangre y tejidos, no cuando se bombea la sangre, por lo que no se tomará en cuenta una medición pulsátil. Simplemente se tomará en cuenta la cantidad de luz que deje pasar la muestra.

Uno de los instrumentos actuales para la gasometría arterial son: los oxímetros de pulso, sensores no invasivos que permiten medir la saturación del oxígeno en la sangre [26]. Para la medición de núcleos de burbujas en el cuerpo por gases inertes se utiliza un aparato que funciona por efecto Doppler², éste manda una señal a una frecuencia y dependiendo con que choque esa señal es cuando percibe los núcleos de burbujas, este aparato es muy costoso y casi no se utiliza, además resulta impráctico llevarlo a campo por sus dimensiones [27]. Ambos instrumentos se muestran en la figura 6.1.



Fig. 6.1 Oxímetro de pulso a la izquierda y ultrasonido con efecto Doppler a la derecha [26, 27]

² El efecto Doppler, llamado así por el físico austríaco Christian Andreas Doppler, es el aparente cambio de frecuencia de una onda producida por el movimiento relativo de la fuente respecto a su observador [7].

Con las tecnologías existentes, el diseño estará basado en un oxímetro de pulso, que consiste en un haz infrarrojo y un fotodiodo [28]. La diferencia principal con el oxímetro de pulso es que para tomar las mediciones con este circuito no será necesario medir la luz en las pulsaciones, sino en los tejidos.

En la actualidad los oxímetros se utilizan como un instrumento de seguridad para checar la saturación de oxígeno en las personas. Se utilizan bastante en los hospitales para monitorear también si su pulso es regular y verificar que se esté oxigenando bien la sangre [29].

Estos instrumentos tienen bastante portabilidad y los resultados que dan son suficientes para saber valores de la saturación de oxígeno en la sangre [30].

6.3. Desarrollo de solución para medir el Nitrógeno residual

El oxímetro de pulso sirve para medir la saturación oxígeno en la sangre. Desarrollar un instrumento similar para medir la saturación de nitrógeno en la sangre se podría realizar basándonos en los oxímetros de pulso.

Con las tecnologías existentes, el diseño del circuito estará basado en un oxímetro de pulso [23, 24, 25], que consiste en un haz infrarrojo y un fotodiodo. La diferencia principal con el oxímetro de pulso es que para tomar las mediciones con este circuito no será necesario medir la luz en las pulsaciones, sino en los tejidos.

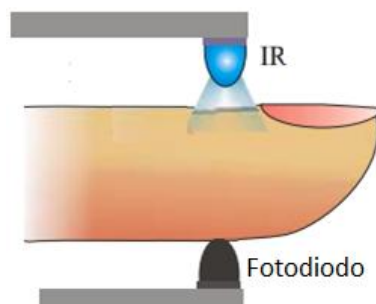


Fig.6.2 Haz infrarrojo que atraviesa muestra y llega al fotodiodo [23]

El circuito se basa en el haz infrarrojo que logra atravesar la muestra y llega a un fotodiodo, como en figura 6.2 que, para obtener una mejor señal se utiliza una fotocelda y un amplificador operacional. La señal analógica es leída por la tarjeta de desarrollo Arduino en forma de valores de voltaje y de gráficas, figura 6.3 En el siguiente capítulo se explicará por qué la necesidad de utilizar estos componentes.

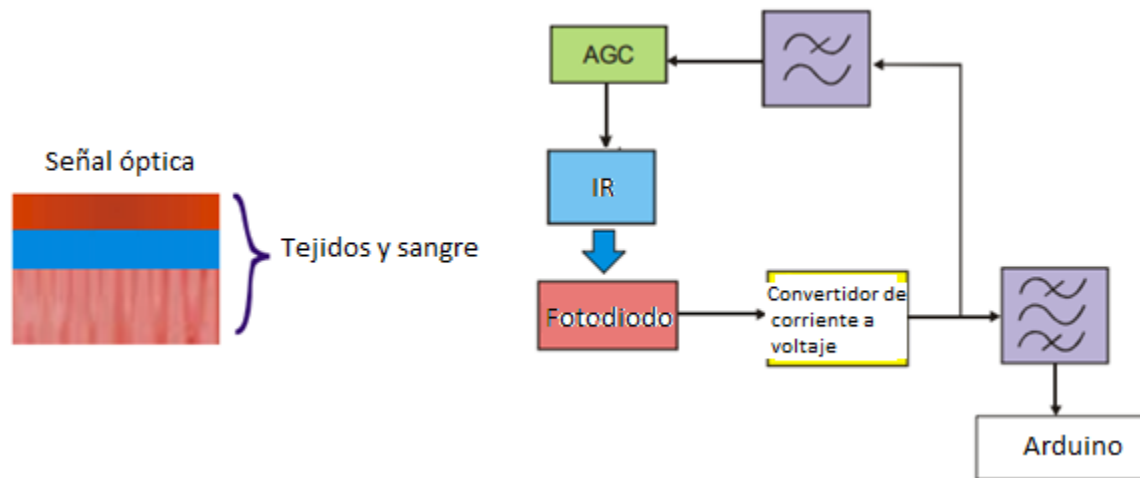


Fig.6.3 Diseño de Circuito[24]

6.3.1. Diseño del circuito

Como se menciona en el capítulo anterior, el circuito a diseñar necesita de ciertos elementos, los cuales se describirán a continuación, se hará mención también de las características de éstos y por qué son relevantes para el nitrómetro.

El circuito consta de los siguientes elementos, como se observa en figura 6.4:

- **Arduino UNO:** Es la tarjeta de desarrollo con un microcontrolador que recibe la señal analógica, después de ser acondicionada por un amplificador operacional y genera información sobre los valores de voltaje que llegan a la fotocelda como resultado de la fotospectrometría. Se eligió este microcontrolador ya que al contar con un código basado en lenguaje C, el desarrollador era familiar con la programación. La lectura analógica del Arduino va del rango de 0 a 1023 unidades. Esto en valores de diferencia de potencial representa de 0 a 5 [V].
- **LED infrarrojo:** Es un diodo emisor de luz infrarroja con longitud de onda de 940 [nm]. Es una longitud de onda que permite realizar mediciones como la queremos que se necesitan, para atravesar la piel y bombardear los tejidos donde el nitrógeno se acumula.
- **Fotocelda BPW-34:** Es un fotodiodo de alta sensibilidad y velocidad, capaz de captar longitudes de onda que van desde los 430-1100nm. Tiene un área de captación de luz de 7.5 [mm²]. Esta fotocelda tiene una sensibilidad mayor cuando se expone a la luz infrarroja.
- **Amplificador operacional LM324N:** Es un amplificador operacional de bajo costo que amplifica la señal de la fotocelda. Se alimenta con fuente singular, como la que puede proveer la tarjeta Arduino. Su función será la de acondicionar la señal de la fotocelda a niveles de voltaje aprovechables por la tarjeta Arduino.
- **Batería de 3 [V] de Litio a 210 [mAh]:** Sirve para alimentar el LED infrarrojo. Se utilizará una batería independiente ya que la corriente del Arduino es de 50 [mA] y es insuficiente para alimentar el LED, así también hará que la fotocelda

tenga una buena respuesta, mientras mayor sea la corriente que se transmita al LED, mayor será la corriente que capte en la fotocelda.

- **Computadora:** Es para la interfaz microcontrolador-humano de Arduino, es donde se programa el Arduino y es dónde se pueden leer los valores de voltaje así como las gráficas mediante la interfaz Processing [32]. La tarjeta Arduino y la computadora se conectan vía puerto USB.

Los elementos tienen el arreglo que se muestra en la figura 6.5.

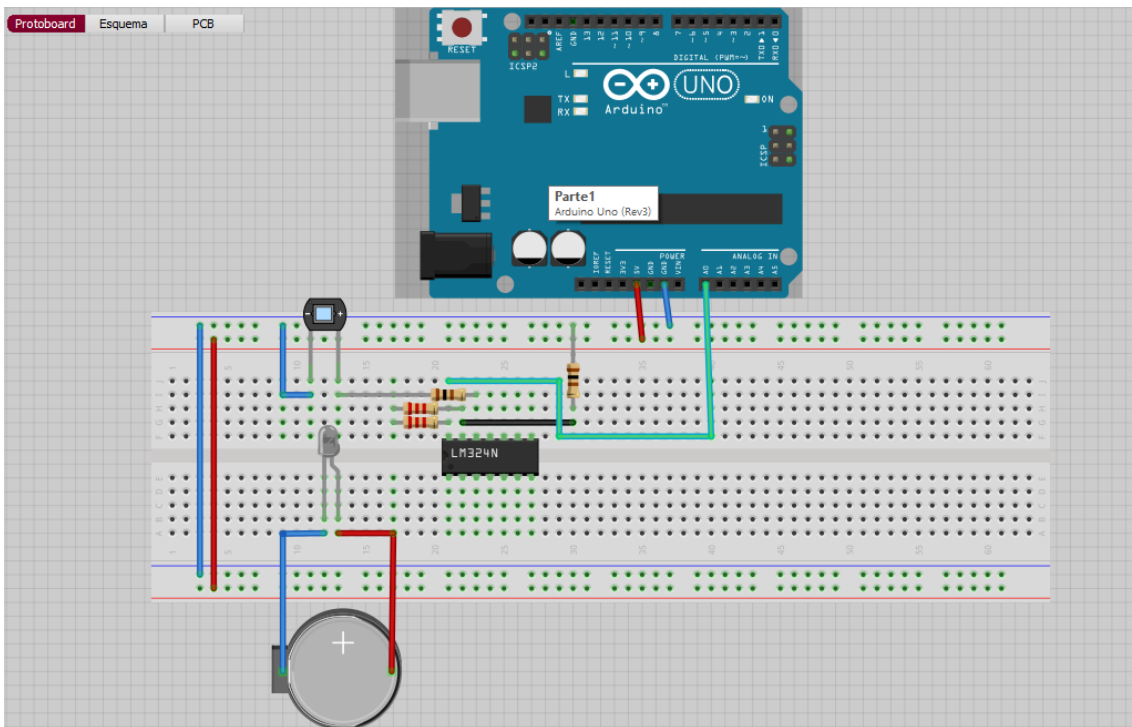


Fig. 6.4. Componentes del circuito

El arreglo utilizado es el de un amplificador No Inversor con una ganancia de 45 veces la señal, la cual se obtiene de la ecuación 5.1.

$$\frac{V_O}{V_I} = \frac{R_1+R_2}{R_3} + 1 = G \quad \text{.....(5.1)}$$

Donde:

V_O y V_I = Voltaje de salida y entrada.

R_X = Resistencia

G = Ganancia

Sustituyendo valores:

$$G = \frac{4400}{100} + 1 = 45$$

Las resistencias que se utilizaron fueron resistencias comerciales, no fue necesario utilizar de precisión.

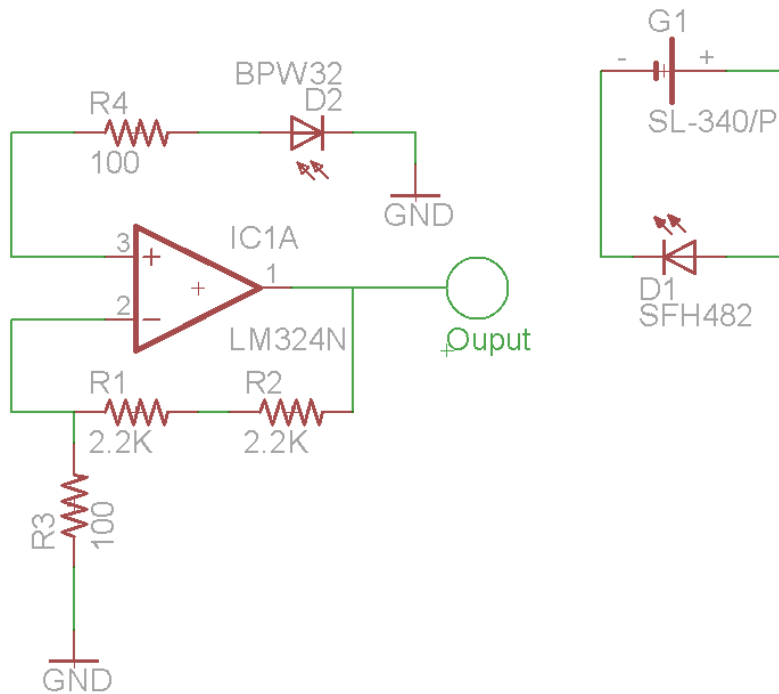


Fig.6.5. Esquema del Circuito

La entrada Analógica del Arduino únicamente lee 5V, en un rango de valores de 0 al 1023 unidades [31].

Para convertir el valor a voltaje se realiza una multiplicación de $V = \frac{\text{valor} \times 5V}{1024}$

Los valores que se obtienen del circuito son lecturas de: mínimo de 1.22 [V] (250 unidades) y máximo de 3.17 [V] (620 unidades).

▣

7. Pruebas y resultados

Las pruebas se realizaron en la Ciudad de México en la Alberca Olímpica Francisco Márquez (AOFM), que es la alberca con mayor profundidad (5 metros). Se debe recordar que a mayor profundidad mayor es la saturación de los gases en los tejidos y sangre.

Tomando en cuenta que la ciudad de México está a una altura de 2,240 m.s.n.m., ver [33], se tomaría como un buceo de altitud, el cual se explicará brevemente para mostrar algunas consideraciones que se tienen que tomar cuando el buceo no es a nivel de mar.

Se considera buceo de altura a partir de los 300 [m] sobre el nivel del mar. Si se está utilizando alguna computadora de buceo se tiene que configurar a la altura a la que se esté buceando. Este cambio es meramente estadístico, basado en ecuaciones como la que se muestra más adelante. Muchos de los instrumentos están calibrados a nivel de mar, por lo que pueden tener fallas a alturas diferentes[34].

Para hacer una equivalencia entre el buceo a nivel de mar y el buceo de altura se utiliza la ecuación 7.1. Esta ecuaciones se conoce como la ecuación de Chauvin[4].

$$P = h + \frac{h * a * \%}{300} \quad \text{.....(7.1)}$$

Donde:

P = Profundidad equivalente al nivel del mar en metros.

h = profundidad a la que se va a realizar la inmersión.

a = altitud del lugar de buceo.

% = porcentaje fijado por la US Navy para cálculo [4]. Siempre se utiliza un 4% por cada 300 [m].

En el caso de la AOFM la profundidad equivalente sería P= 6.5 [m]

Ahora se calcula la presión con la ecuación 7.2.

$$H = \frac{P \cdot h}{p} \dots\dots\dots(7.2)$$

Donde:

H= Profundidad que se va a tomar en cuenta para los cálculos.

P= Presión a nivel del mar

h= Profundidad P a la que llega el buzo.

p= Presión del lugar en donde se va a realizar el buceo

En la ciudad de México existe una presión de 580 [mmHg]. Con este valor la profundidad que se va a tomar en cuenta será de H=8.5 [m].

Con estos datos ya se pueden usar las tablas de buceo tradicionales. El dato que más se acerca en las tablas, es el primero, que son 12 [m] (consultar Anexo 1). Este dato afecta un poco los cálculos ya que en las tablas se considera a partir de 12 metros y no de 8 metros. El cambio de saturación de los gases es mínimo pero aun así deberá ser identificable por el nitrómetro. En el buceo la presión se toma en cuenta por cada 10 metros de profundidad, que representa 1[ata]. El buceo se realizó durante 80 minutos. Es decir, utilizando las tablas convencionales a una profundidad de 12 [m] durante 80 minutos los buzos salen en el grupo H. En este grupo ya hay nitrógeno diluido en la sangre y tejidos.

Se tuvieron que realizar varias pruebas, por lo que se eligieron 2 grupos de buceo. El primero (Grupo A) es de 4 personas adultas y el segundo (Grupo B) es de 6 estudiantes más jóvenes. Estas características se muestran en las tablas que están a continuación (ver Tabla 7.1 y 7.2).

Tabla 7.1 Características del Grupo A.

Etiqueta	Sexo	Edad	Peso [kg]	Estatura[m]
Buzo A1	Masculino	61 años	83	1.70
Buzo A2	Masculino	42 años	82	1.71
Buzo A3	Femenino	59 años	57	1.53
Buzo A4	Femenino	51 años	75	1.57

Tabla 7.2 Características del Grupo B

Etiqueta	Sexo	Edad	Peso [kg]	Estatura[m]
Buzo B1	Masculino	22 años	86	1.73
Buzo B2	Masculino	25 años	75	1.68
Buzo B3	Femenino	23 años	62	1.63
Buzo B4	Masculino	28 años	84	1.83
Buzo B5	Femenino	26 años	65	1.58
Buzo B6	Femenino	24 años	58	1.66

Las pruebas se realizaron de la siguiente manera, tanto antes como después de la inmersión:

1. Se coloca en nitrómetro diseñado en el dedo índice de cada persona como se representa en la figura 6.2.
2. Ya colocado el dispositivo había que esperar a que el voltaje se estabilizara en la interfaz.
3. Leer los datos y gráficas de la computadora.
4. Tener una base de datos y guardar los resultados para así poder compararlos.

En las gráficas, que se encuentran en la sección de Anexos, se muestra la parte en que el voltaje se estabiliza, ya que como se menciona antes, no nos interesa la medición pulsátil.

En la Tabla 7.3 y 7.4 se muestran los valores obtenidos a partir de las gráficas.

Tabla 7.3 Valores obtenidos del Grupo A.

Nombre	Valor Inicial	Voltaje Inicial [V]	Valor Final	Voltaje Final [V]	Δ Valor	Δ Voltaje [V]
Buzo A1	335	1.64	436	2.13	101	0.49
Buzo A2	334	1.63	451	2.20	117	0.57
Buzo A3	337	1.65	423	2.07	86	0.42
Buzo A4	338	1.65	466	2.28	128	0.63

Tabla 7.4 Valores obtenidos del Grupo B.

Nombre	Valor Inicial	Voltaje Inicial [V]	Valor Final	Voltaje Final [V]	Δ Valor	Δ Voltaje [V]
Buzo B1	338	1.65	436	2.13	98	0.48
Buzo B2	335	1.64	418	2.04	83	0.41
Buzo B3	334	1.63	426	2.08	92	0.45
Buzo B4	336	1.64	435	2.12	99	0.48
Buzo B5	337	1.65	452	2.21	115	0.56
Buzo B6	334	1.63	440	2.15	106	0.52

En la Tabla 7.5 se muestra el consumo aproximado de aire en la práctica. En el manómetro se muestran unidades de 250 en 250 unidades de [psi] por lo que se toma el entero menor próximo por seguridad. Todos los buzos entraron con 3000 [psi].

Tabla 7.5 Consumo de aire

Nombre	Presión Inicial [psi]	Presión Final [psi]	Δ Presión [psi]
Buzo A1	3000	1250	1750
Buzo A2	3000	750	2250
Buzo A3	3000	1250	1750
Buzo A4	3000	500	2500
Buzo B1	3000	1250	1750
Buzo B2	3000	1750	1250
Buzo B3	3000	1500	1500
Buzo B4	3000	500	2500
Buzo B5	3000	500	2500
Buzo B6	3000	750	2250

Se puede ver en las tablas que al iniciar todas las personas mostraban valores similares en la medición, en contraste con las mediciones obtenidas al final donde hay variación.

También se puede apreciar en las tablas que las personas con más cambios en los valores obtenidos por el nitrómetro fueron aquellas que más aire consumieron del cilindro, así también se sabe que tales personas fueron mujeres u hombres con más grasa corporal. Cabe recordar que, acorde a la teoría, las personas con mayor grasa corporal absorben más nitrógeno residual.

En todas las personas hubo aumento en la cantidad de nitrógeno residual representado por una diferencia de potencial, por lo cual se comprueba la variación de éste gas en los tejidos y sangre mediante las técnicas empleadas de espectrometría en el nitrómetro.

En los resultados que se tienen en las tablas 7.3 y 7.4 se muestran como intervienen todas las características de las personas, se ve en los resultados la influencia de ser mujer, hombre, tener mejor condición física, el consumo de aire, los tejidos grasos, etc.

Las personas con mayor cantidad de nitrógeno residual fueron las que tienen más tejidos grasos, tienen menos condición física y que consumieron más aire.

Las últimas pruebas fueron las que realizó el autor del trabajo.

Las características de la persona para estas pruebas son:

-Edad: 24 años

-Peso: 65 [kg]

-Talla: 1.75 [m]

-Sexo: Masculino

Se realizaron dos inmersiones, la primera donde se procuró hacer la menor actividad física posible para consumir menos aire. En esta inmersión no se nadó en la alberca. Al contrario de la segunda inmersión que se estuvo con mayor actividad física (se estuvo nadando alrededor de la alberca) y mayor consumo de aire (se respiraba más de lo que se necesitaba). Al igual que los demás buzos la inmersión se realizó con 3000 [psi].

Al realizar la primera inmersión el circuito marcaba como valor inicial 336 unidades (1.64 [V]) y al salir con un valor final de 386 unidades (1.88 [V]). Recordemos que los niveles de diferencia de potencial muestran la cantidad de luz que deja pasar la sangre y tejidos. La presión en el cilindro de 2250 [psi] a la salida muestra que se tuvo un consumo de aire de tan solo de 750 [psi].

En la primera prueba se tuvo que esperar tres horas aproximadamente para que el circuito volviera a dar un valor de 336 unidades. Fueron 180 minutos para eliminar el nitrógeno residual.

En la segunda inmersión el circuito marcaba un valor inicial de 335 unidades (1.63 [V]) y al salir un valor final de 448 unidades (2.18 [V]). El cilindro marcaba una presión de 500 [psi] al salir, esta vez hubo un consumo de 2500 [psi] aproximadamente. Se tuvieron que esperar siete horas aproximadamente para restablecer los valores iniciales. Más del doble de tiempo para eliminar el nitrógeno residual.

Las pruebas realizadas en el autor del trabajo fueron para determinar el tiempo en que se eliminaba el nitrógeno residual.

Este tiempo, simularía el intervalo de tiempo en superficie que es el que se tendría que esperar para realizar una segunda inmersión. En el caso de la primera prueba se pudo haber realizado una segunda inmersión, sin correr riesgo de sufrir la enfermedad por descompresión, mucho antes que el resultado de la segunda prueba. Cabe destacar que se estuvo el mismo tiempo pero el consumo de aire fue distinto.

▣

8. Análisis y discusión de resultados

En las muestras que se tomaron, tanto en el grupo de adultos mayores como en el de jóvenes, se exhiben resultados muy parecidos para las personas con una compleción similar, es decir, al peso, género y estatura.

La mayoría tiene valores iniciales casi iguales o iguales, una diferencia de una unidad, lo cual quiere decir que el circuito está midiendo correctamente la longitud de onda puesto que el color de la sangre es muy similar en todas las personas, de un color índigo. El color de la sangre lo da la hemoglobina y todos presentan esta sustancia en el cuerpo. Es por eso que se tiene ese resultado. El resultado que varía es el final, aunque en algunos son valores parecidos, hay menos coincidencias que en los valores iniciales. Esto quiere decir que hay un cambio en la absorción de luz. Este cambio de absorción de luz se debe a la presencia de gases en la hemoglobina, en el caso del buceo se tiene el nitrógeno residual. En algunas personas es mayor y en otras personas es menor el cambio. En todas las muestras disminuye el nivel de absorción, es decir, deja pasar más luz. Lo que pasa en estas muestras es que la absorción de nitrógeno en los tejidos permite el paso de más luz.

Teniendo los datos de las características de las personas se da una cuenta que en donde es mayor el cambio es en las mujeres, personas adultas y personas con más índice de grasa corporal. Como se menciona en el marco teórico, el nitrógeno suele diluirse más en los tejidos grasos.

Cuanto mayor es la absorción del nitrógeno, mayor es la cantidad de luz que logra llegar a la fotocelda. Estos resultados se muestran en las tablas 7.3 y 7.4

Las pruebas fueron suficientes para poder saber si había un cambio en la forma en que la luz pasaba a la fotocelda en las diferentes personas. Al tomar las muestras iniciales las personas tienen los valores iguales en los datos que arroja el circuito. Las muestras finales varían en todas las personas. Con eso puede observarse también que no todas las personas salen con la misma cantidad de nitrógeno residual.

Éste valor depende de muchos factores, por ejemplo, la cantidad de aire que consume, las características fisiológicas y fisionómicas de cada cuerpo, la actividad que realizada cotidianamente, etc.

Sabiendo que el circuito detecta el nitrógeno residual se podría utilizar como un instrumento de seguridad para los buzos. Además de las tablas que utilizan, podría corroborarse información con el nitrómetro para así poder tener inmersiones más eficientes en cuanto a la seguridad y tiempos.

Serviría como instrumento de seguridad porque permitiría ver la saturación real del nitrógeno residual en la sangre después de una inmersión. Este resultado serviría para obtener el tiempo de intervalo en superficie para planificar una segunda inmersión. Al salir de ésta, nuevamente podríamos obtener la saturación de nitrógeno residual. Estos datos que obtengamos se pueden verificar con las tablas, para tener una mayor seguridad.

Un solo instrumento de éstos podría utilizarse para un grupo de buceo y así se podría tener resultados de varias personas sin tener que personalizar el instrumento como lo hacen con las computadoras de buceo.

Incluso podría utilizarse como un instrumento de seguridad para gente que práctica buceo recreativo sin licencia, que no es lo ideal, para obtener valores de nitrógeno residual y así verificar realmente si se puede abordar un avión sin correr el riesgo de sufrir una enfermedad por descompresión.

Hacer uso de éste instrumento y combinando su uso con las tablas evitaría que muchas personas, que no saben las reglas del buceo, llegaran a las enfermedades por descompresión.

El uso del nitrómetro también podría ser utilizado en las cámaras hiperbáricas cuando un buzo llega de emergencia. Esto sucedería en caso de que el buzo no haya respetado las tablas y sus límites (profundidad-tiempo) y los haya excedido, causando así la enfermedad por descompresión. Dentro de una cámara hiperbárica podría utilizarse como un instrumento de medición para ver cómo va reduciéndose poco a poco la cantidad de nitrógeno residual con el tratamiento que se da en este tipo de cámaras.

9. Conclusiones

El circuito diseñado funcionó para medir la cantidad de nitrógeno residual, tal vez no en orden cuantitativo sino cualitativo al poder determinar un valor base de nitrógeno en el cuerpo antes de una inmersión y la elevación que se experimenta de la misma. Se logró obtener resultados deseados con las pruebas realizadas, el principal resultado es que con este circuito se puede saber qué persona tiene mayor cantidad de nitrógeno residual en la sangre. Como se expresa en la hipótesis, cada persona tiene diferente metabolismo y por lo tanto diferentes tiempos de eliminar el nitrógeno residual como lo mostraron las pruebas realizadas en el autor.

En las pruebas que se realizaron a los buzos únicamente se obtuvieron valores diferentes a la salida de los buzos. No todos salen con los mismos valores. Estos valores son los que demuestran la presencia de nitrógeno residual en la sangre. El instrumento fue utilizado, como se describe en las pruebas, por diversas personas con diferentes características fisiológicas y fisionómicas. Es un instrumento que puede ser utilizado por todas las personas sin necesidad de ajustarlo a cada una.

El instrumento se desarrolló para poder tener una lectura del nitrógeno residual que se tiene al momento de emerger. Si se recuerda, las tablas son datos meramente estadísticos, no dice la cantidad de nitrógeno residual que presenta la persona. Con este instrumento se podría saber la cantidad específica y así planificar mejor el buceo. Además al utilizarse junto con las tablas de buceo se práctica una inmersión más segura y brindaría confianza al buzo ya que sabría los límites a los que puede llegar.

Los valores de nitrógeno residual obtenidos no se pueden relacionar con un porcentaje ya que no se realizaron pruebas de laboratorio de gasometría arterial, para saber exactamente los niveles de nitrógeno.

El instrumento se diseñó específicamente para el buceo deportivo y recreativo, donde no se utilizan mezclas de gases y por lo tanto hay más saturación del nitrógeno residual en los buzos. Esto no quiere decir que se pueda utilizar en buceo profundo, en aguas frías, o en otro tipo de buceo, pues aunque haya mezclas de gases la saturación del nitrógeno siempre existirá, sólo que es más común cuando se utiliza únicamente aire.

Con el circuito diseñado el buzo se puede realizar una medición constante después de una inmersión para saber si todavía presenta nitrógeno residual o no. Al saber esto puede aprovechar más el tiempo y no tendría que depender totalmente de sus tablas de buceo que son resultados estadísticos.

En la industria del buceo la tecnología que existe son las computadoras de buceo, que como se describieron con anterioridad tienen que ser personalizadas y los datos que arrojan están basados en los actuales algoritmos con los que se hicieron las tablas de buceo. Estas computadoras de buceo son para seguridad, pues tienen alarmas de cuando se han excedido los límites que marcan las tablas. También tienen brújulas y también sirven para planificar el buceo.

En la actualidad no existe un instrumento que indique la cantidad de nitrógeno residual presente en el cuerpo. Lo cual ha causado que los buceos se planifiquen con datos que se han utilizado mínimo por 50 años. No ha habido actualizaciones en la tecnología de instrumentos de seguridad ni en las tablas, únicamente en las computadoras de buceo.

El nitrómetro desarrollado bien podría utilizarse como un instrumento adicional para la seguridad del buzo, o simplemente para ver cómo evoluciona el nitrógeno residual en nuestro cuerpo. Por lo que podría utilizarse en hospitales especializados en medicina hiperbárica para saber los niveles de nitrógeno residual y también podría utilizarse en hoteles o centros recreativos para brindar seguridad a la experiencia de buceo que tienen muchos vacacionistas sin licencia.

También se cumple con la hipótesis de que cada persona elimina el nitrógeno residual conforme a su metabolismo, al igual que no todas las personas tienen la misma saturación de nitrógeno residual aunque se haya estado el mismo tiempo y a la misma profundidad.

Esto es muy importante ya que con éste circuito se podría saber con certeza la cantidad de nitrógeno residual que se tiene y el momento en que se elimina por completo.

▣

10. Trabajo a futuro

En el trabajo a futuro hay varias consideraciones que se pueden tomar en cuenta para una posterior iteración del nitrómetro desarrollado, entre ellas están:

- Realizar un diseño orientado a ser un producto. Diseñar un sistema de sujeción especial para tomar las mediciones sin que estén expuestos los transductores utilizados, que no se tenga que conectar a una computadora, forzosamente, y simplemente poder obtener datos en un display de mayor portabilidad, como es el caso de las computadoras actuales de buceo.
- Saturación de Nitrógeno residual. Poder obtener una relación real de la saturación de nitrógeno residual con pruebas de laboratorio de gasometría arterial para adicionar esos datos en el algoritmo de procesamiento y dar datos más fieles que permitan hacer más eficientes los tiempos de espera entre inmersiones sin poner en peligro la salud.
- Realizar pruebas en mar abierto. Sería conveniente hacer inmersiones en el mar, donde la profundidad es mayor y por lo tanto también la presión, esto para obtener datos útiles para entender la presencia y el comportamiento del nitrógeno residual en diferentes buzos.

Este tema es bastante interesante y se puede tener un gran beneficio ya que es un equipo que se utilizaría en cuestiones de cámaras hiperbáricas y dentro de la comunidad de buceo, es decir, los usuarios potenciales serían buzos y pacientes o especialistas de medicina hiperbárica. A muchos practicantes de esta actividad les llamo la atención este proyecto ya que en la actualidad existen tecnologías que no se han actualizado mucho y en cuanto a las computadoras de buceo, son bastante caras. Este tema fue platicado a maestros y alumnos de la AOFM y en cuanto a los profesores la totalidad de ellos les

causó interés el desarrollo de un circuito capaz de realizar lo que hace el medidor de nitrógeno residual. En cuanto a los alumnos, de una clase de principiantes (sin licencia) de 16 personas a 13 les llamó la atención ya que los demás no sabían el riesgo que se tiene al bucear. De mis compañeros de clase que son nueve a todos les interesó la idea.

Las computadoras de buceo podrían tener inclusive una conexión a un circuito para así poder comparar los algoritmos que éstas tienen programadas con un valor a tiempo real y así poder brindar mayor seguridad al practicar éste deporte.



11. Anexos

Anexo 1
Tablas de Buceo



DIVE TABLES

TABLE 1 - END-OF-DIVE LETTER GROUP

WARNING: EVEN STRICT COMPLIANCE WITH THESE TABLES WILL NOT GUARANTEE AVOIDANCE OF DECOMPRESSION SICKNESS. CONSERVATIVE USAGE IS STRONGLY RECOMMENDED.

RNT RESIDUAL NITROGEN TIME
+ADT ACTUAL DIVE TIME
TNT TOTAL NITROGEN TIME

(USE THIS FIGURE TO DETERMINE END-OF-DIVE LETTER GROUP.)

START DEPTH M	START DEPTH FEET	00		00									
		MAXIMUM DIVE TIME (MDT)		DIVE TIME REQUIRING DECOMPRESSION NO. MINUTES REQUIRED AT 15' STOP (5M)									
12	40	5	15	25	30	40	50	70	80	100	110	130	150
15	50		10	15	25	30	40	50	60	70	80		100
18	60		10	15	20	25	30	40	50	55	60	80	100
21	70		5	10	15	20	30	35	40	45	50	60	70
24	80		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60
27	90		5	10	12	15	20	25	30	35	40	45	50
30	100		5	7	10	15	20	25	30	35	40	45	50
33	110			5	10	13	15	20	25	30	35	40	50
36	120			5	10	12	15	20	25	30	35	40	50
39	130			5	8	10	15	20	25	30	35	40	50

M.	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	NEW GROUP	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
FT.	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130														
7	6	5	4	4	3	3	3	3	3	3	A	24:00	24:00	24:00	24:00	24:00	24:00	24:00	24:00	24:00	24:00	24:00	24:00	
123	74	50	41	31	22	19	12	9	5	5		0:10	3:21	4:50	5:49	6:35	7:06	7:36	8:00	8:22	8:51	8:59	9:13	
17	13	11	9	8	7	7	6	6	6	6	B		3:20	4:49	5:48	6:34	7:05	7:35	7:59	8:21	8:50	8:58	9:12	
113	67	44	36	27	18	15	9	6				0:10	1:40	2:39	3:25	3:58	4:26	4:50	5:13	5:41	5:49	6:03		
25	21	17	15	13	11	10	10	9	8	8	C			1:39	2:38	3:24	3:57	4:25	4:49	5:12	5:40	5:48	6:02	
105	59	38	30	22	14	12	5					0:10	1:10	1:58	2:29	2:59	3:21	3:44	4:03	4:20	4:36			
37	29	24	20	18	16	14	13	12	11	11	D			1:09	1:57	2:28	2:58	3:20	3:43	4:02	4:19	4:35		
93	51	31	25	17	9	8						0:10	0:55	1:30	2:00	2:24	2:45	3:05	3:22	3:37				
49	38	30	26	23	20	18	16	15	13	13	E			0:54	1:29	1:59	2:23	2:44	3:04	3:21	3:36			
81	42	25	19	12	5	4						0:10	0:46	1:16	1:42	2:03	2:21	2:39	2:54					
61	47	36	31	28	24	22	20	18	16	16	F			0:45	1:15	1:41	2:02	2:20	2:38	2:53				
69	33	19	14	7								0:10	0:41	1:07	1:30	1:48	2:04	2:20						
73	56	44	37	32	29	26	24	21	19	19	G			0:40	1:06	1:29	1:47	2:03	2:19					
57	24	11	8									0:10	0:37	1:00	1:20	1:36	1:50							
87	66	52	43	38	33	30	27	25	22	22	H			0:36	0:59	1:19	1:35	1:49						
43	14											0:10	0:34	0:55	1:12	1:26								
101	76	61	50	43	38	34	31	28	25	25	I			0:33	0:54	1:11	1:25							
29	4											0:10	0:32	0:50	1:05									
116	87	70	57	48	43	38					J			0:31	0:49	1:04								
14												0:10	0:29	0:46										
138	99	79	64	54	47						K			0:28	0:45									
161	111	88	72	61	53						L			0:10	0:27									
															0:26									
															0:10									

TABLE 3 - REPETITIVE DIVE TIMETABLE

TABLE 2 - SURFACE INTERVAL TIME (SIT) TABLE

00 LIGHT FACE NUMBERS ARE RESIDUAL NITROGEN TIMES (RNT) TIME RANGES IN HOURS : MINUTES © 1989 NAUI
 00 BOLD FACE NUMBERS ARE ADJUSTED MAXIMUM DIVE TIMES (AMDT) ACTUAL DIVE TIME SHOULD NOT EXCEED THIS NUMBER #30033/Rev. 1/97

Anexo 2
Código para leer voltaje en Arduino

Código para leer voltaje en el software de Arduino:

```
void setup()

{// initialize serial communication at 9600 bits per second:

  Serial.begin(9600);

}

// the loop routine runs over and over again forever:

void loop() {

  // print out the value you read:

  Serial.println(analogRead(A0));

  // delay in between reads for stability

  delay(100);

}
```

Anexo 3

Código para graficar voltaje en Arduino

Código para graficar el voltaje directo que se obtiene mediante el Arduino en la interfaz de Processing

```
import processing.serial.*;

Serial myPort;    // Puerto serial

int xPos = 1;    // Posición horizontal de la gráfica

void setup () {

// Set the window size:

size(400, 300);

// List all the available serial ports

println(Serial.list());

// Open the port that is used

myPort = new Serial(this, Serial.list()[1], 9600);

myPort.bufferUntil('\n');

// set initial background:

background(0);

}

void draw () {

// everything happens in the serialEvent()

}
```

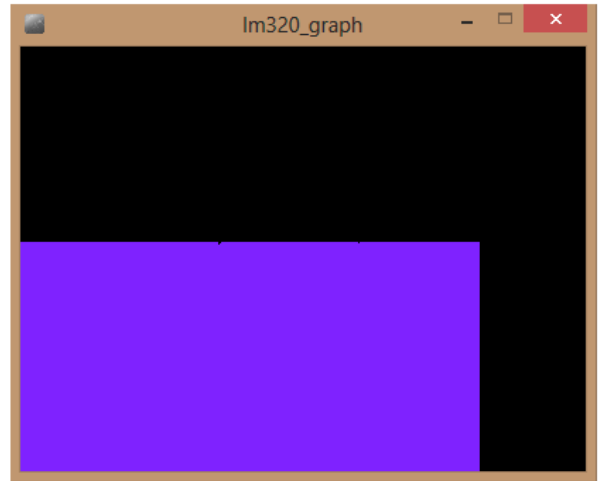
```

void serialEvent (Serial myPort) {
// get the ASCII string:
String inString = myPort.readStringUntil('\n');
if (inString != null) {
// trim off any whitespace:
inString = trim(inString);
// convert to an int and map to the screen height:
float inByte = float(inString);
inByte = map(inByte, 0, 1023, 0, height);
// draw the line:
stroke(127,34,255);
line(xPos, height, xPos, height - inByte);
// at the edge of the screen, go back to the beginning:
if (xPos >= width) {
xPos = 0;
background(0);
}
else {
// increment the horizontal position:
xPos++;
}
}
}
}

```

Anexo 4

Gráficas y valores iniciales y finales de los buzos



COM4

Enviar

335
335
335
335
335
335
335
335
335
335
335
335
335
335
335
335

Desplazamiento automático Retorno de Carro 9600 baud

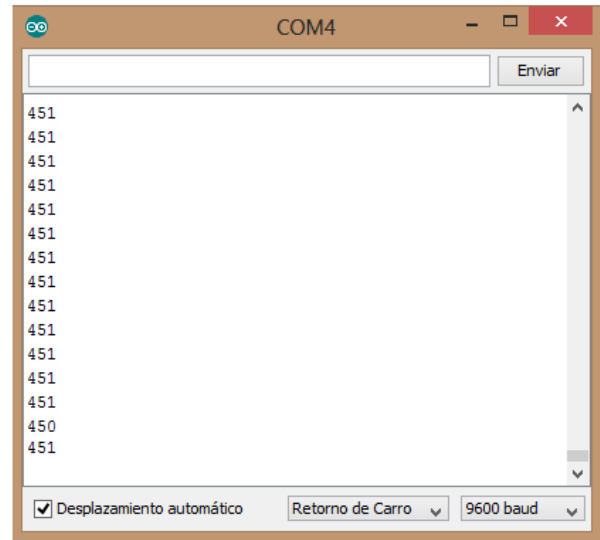
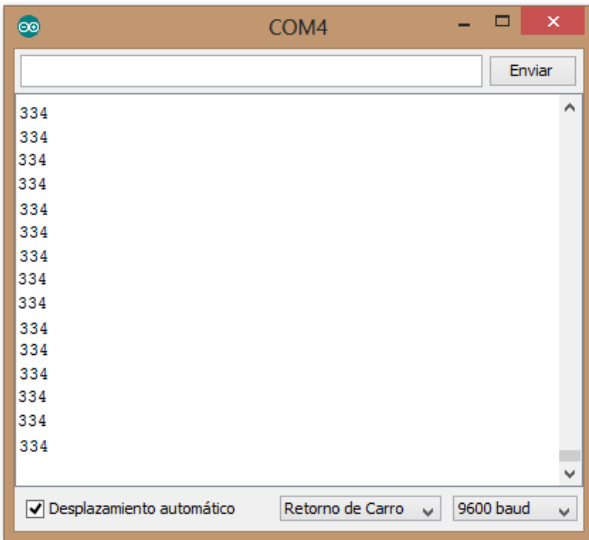
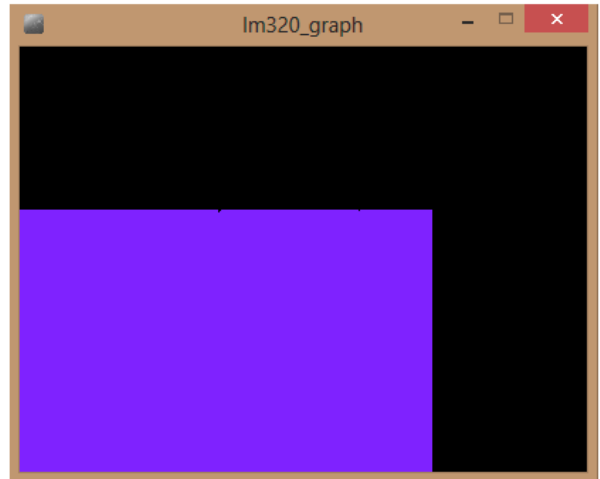
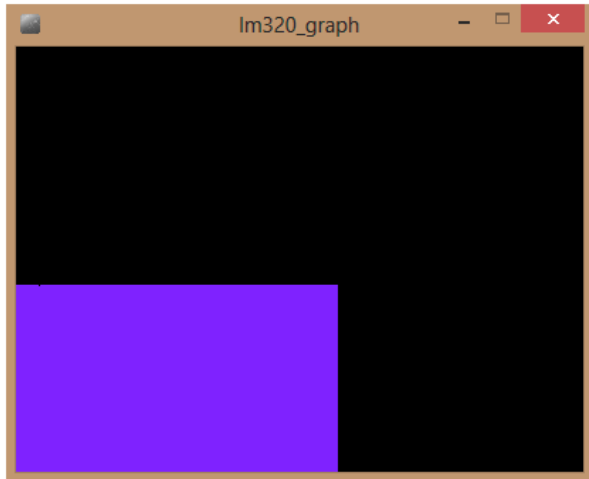
COM4

Enviar

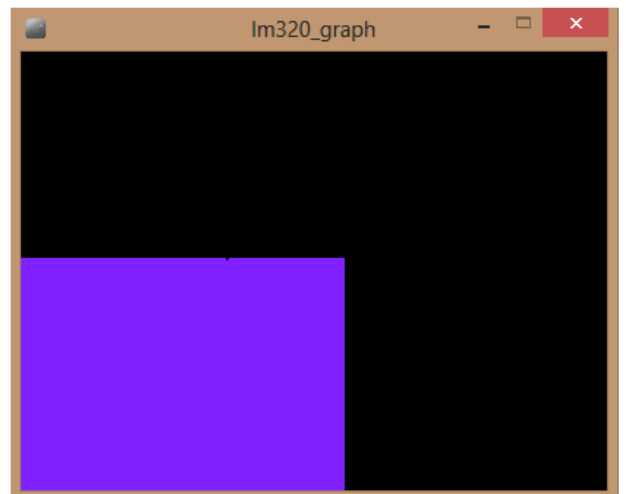
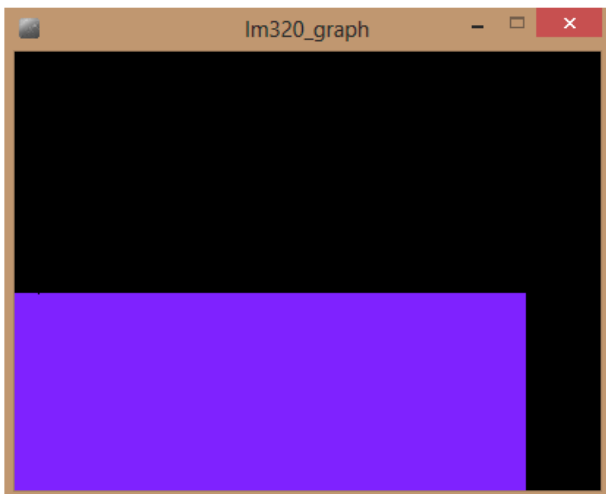
436
436
436
436
436
436
436
436
436
435
436
436
436
435
436
436
436

Desplazamiento automático Retorno de Carro 9600 baud

Graficas del Buzo A1.



Gráficas del Buzo A2.



COM4

Enviar

337
337
337
337
337
337
337
337
337
337
337
337
337
337
337

Desplazamiento automático Retorno de Carro 9600 baud

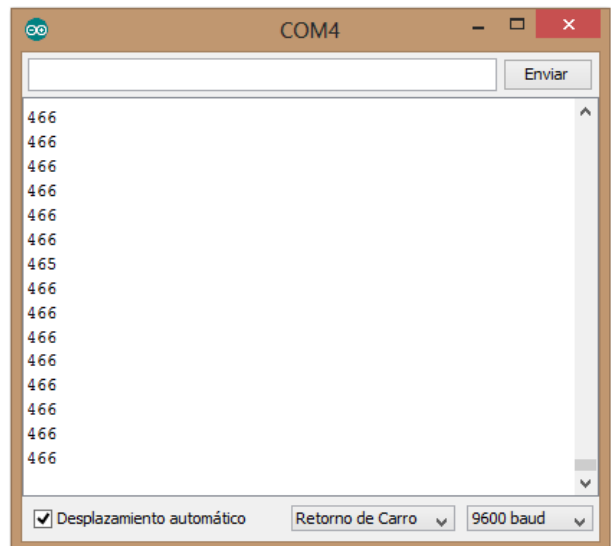
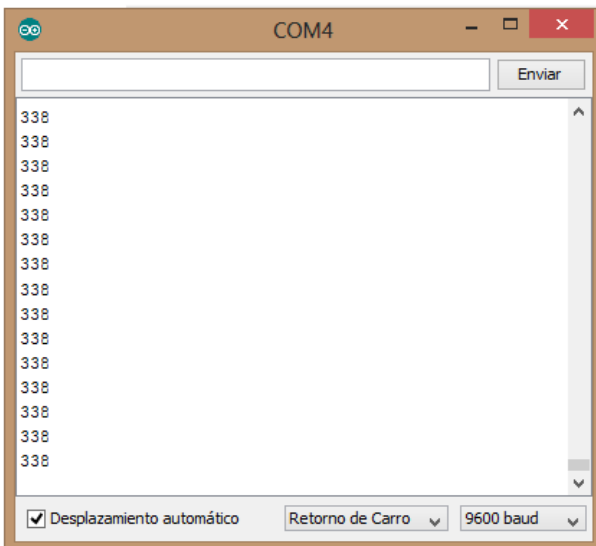
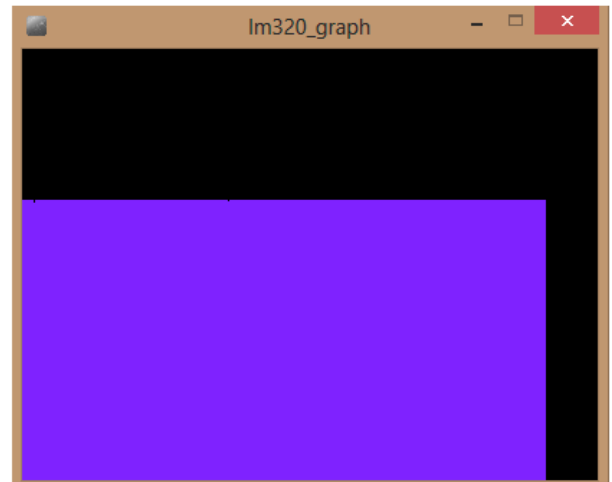
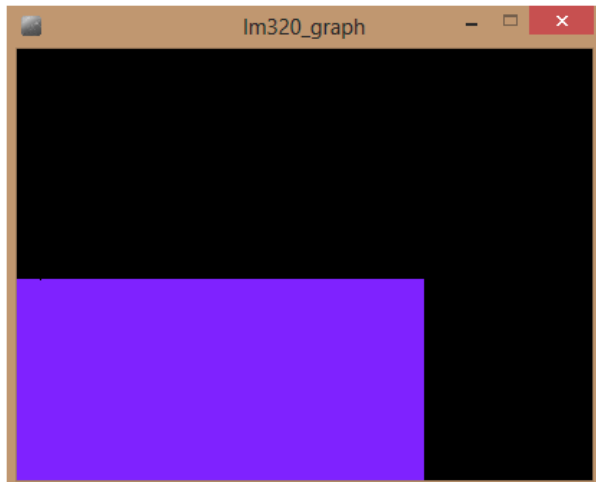
COM4

Enviar

423
423
423
423
422
423
423
423
423
423
424
423
423
423
423
423

Desplazamiento automático Retorno de Carro 9600 baud

Gráficas del Buzo A3.



Gráficas del Buzo A4.



12. Bibliografía

- [1] Definición de buzo, disponible en <http://www.latin-dictionary.net/definition/7048/bucina-bucinae>, fecha de consulta: 20/12/2013.
- [2] Allène S., *Phuket: The ancient ways of breathing underwater*, disponible en <http://www.thephuketnews.com/phuket-the-ancient-ways-of-breathing-underwater-35436.php>, fecha de consulta: 08/02/2013.
- [3] Ivanova D., et al., *Diving*, disponible en <http://library.thinkquest.org/28170/221.html>, fecha de consulta: 12/02/2013.
- [4] *Diving Chambers*, disponible en <http://www.divingheritage.com/chamberskern.htm>, fecha de consulta: 15/02/2013.
- [5] *U.S. Navy diving manual*, disponible en http://www.usu.edu/scuba/navy_manual6.pdf, fecha de consulta: 4/03/2013.
- [6] http://www.divinghelmet.nl/divinghelmet/1860_Rouquayrol_Denayrouze.html, fecha de consulta: 16/02/2013.
- [7] Tippens, P., *Física*, disponible en <http://es.scribd.com/doc/124991643/FISICA-PAUL-E-TIPPENS-7MA-EDICION-REVISADA-pdf>, fecha de consulta: 18/05/2013.
- [8] *Transporte de oxígeno en la sangre*, disponible en <http://www.fundabiomed.fcs.uc.edu.ve/cap72.pdf>, fecha de consulta: 21/06/2013.
- [9] International Association of Fire Fighters, *Diving Medicine*, disponible en http://www.iaff.org/hs/Resi/diving_medicine.htm, fecha de consulta: 25/07/2013.
- [10] Ayerra I., *Conoce las intoxicaciones por gases respirados a alta presión causantes de accidentes bioquímicos en el buceo*, disponible en <http://info.aguamarbuceo.com/Medicina/Sobredosis%20gaseosa.pdf>, fecha de consulta: 18/09/2013.

- [11] Felmer A., Valverde D., et. Al., *Patologías del buceo; guía clínica y de primeros auxilios*, disponible en <http://gpsbuceo.com/medicina/patologias-del-buceo.pdf>, fecha de consulta: 13/07/2013.
- [12] <http://lema.rae.es/drae/?val=descompresi%C3%B3n>, fecha de consulta: 16/07/2013.
- [13] Verjano F., *El hombre subacuático: manual de fisiología y riesgos del buceo*, disponible en <http://books.google.com.mx/books?id=LuQYZaY3b6wC&pg=PA172&|pg=PA172&dq=tablas+dciem&source=bl&ots=qXuu04OyFE&sig=qx-Zdn35szRo9XFXo4wzIR72Mzo&hl=es&sa=X&ei=aQCLUY3ZAqHL0wG2jYHwDg&ved=0CDQQ6AEwAQ#v=onepage&q=tablas%20dcim&f=false>, fecha de consulta: 09/08/2013.
- [14] Biblioteca Digital de la Universidad de Chile, *Transporte de gases por la sangre*, disponible en http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/lb/ciencias_quimicas_y_farmaceuticas/stainera/parte03/07.html, fecha de consulta: 21/07/2013.
- [15] Gómez J., Complicaciones neurológicas de la enfermedad por descompresión de los buceadores, disponible en [http://anmdecolombia.net/pdf/Ultima%20y%20Actual%20Etapa,%20Cambia%20a%20Revista%20Medicina/Vol%2010%20\(19\)%3B%20Ago.%201988/No.%2019,%20Ago.%201988/Complicaciones%20Neurologicas%20de%20la%20Enfermedad%20por%20Decompresion%20de%20los%20Buceadores%20P.%2031-33.PDF](http://anmdecolombia.net/pdf/Ultima%20y%20Actual%20Etapa,%20Cambia%20a%20Revista%20Medicina/Vol%2010%20(19)%3B%20Ago.%201988/No.%2019,%20Ago.%201988/Complicaciones%20Neurologicas%20de%20la%20Enfermedad%20por%20Decompresion%20de%20los%20Buceadores%20P.%2031-33.PDF), fecha de consulta: 24/07/2013.
- [16] Candenás F., *Las microburbujas y las paradas profundas*, disponible en <http://www.clubuceocias.org/?q=node/21>, fecha de consulta: 24/07/2013.

- [17] Todo Buceo, *Conocimientos básicos*, disponible en <http://www.todobuceo.es/conocimientos-basicos/tipos-inmersiones.php>, fecha de consulta: 22/10/2013.
- [18] *Terapéutica hiperbárica en medicina de urgencias*, disponible en <http://ww2.castellon.san.gva.es/urgencias/phocadownload/terapeutica%20hiperbrica%20en%20urgencias.pdf>, fecha de consulta: 16/11/2013.
- [19] Londong Diving Chamber, *History of Hiperbarics*, disponible en <http://newleafhyperbarics.com/about-new-leaf/history-of-hyperbarics>, fecha de consulta: 09/11/2013.
- [20] Morrison S., DIY decompression, disponible en <http://www.lizardland.co.uk/DIYDeco.html>, fecha de consulta: 04/08/2013.
- [21] Martin L., *Questions and Answers on physiology and medical aspects of SCUBA diving*, disponible en <http://www.lakesidepress.com/pulmonary/books/scuba/sectiona.htm>, fecha de consulta: 23/06/2013.
- [22] Gerth W., Vann R., *Probabilistic gas and bubble dynamics models of decompression sickness occurrence in air and nitrogen-oxygen diving*, disponible en <http://lib.bioinfo.pl/pmid:9444059>, fecha de consulta: 12/10/2013.
- [23] Bert P., Scott J., *Decompression theory: Robert Workmann and Prof. A. Bühlmann*, disponible en <http://www.dive-tech.co.uk/workman%20and%20buhlmann.htm>, fecha de consulta: 12/12/2013.
- [24] Anttila M., *Gradient Factors*, disponible en http://www.aqua.ru/imu/Image/image_gradient/grad.pdf, fecha de consulta: 27/11/2013.

- [25] Yoshiya I., et. Al., Spectrophotometric monitoring of arterial oxygen saturation in the fingertip, disponible en <http://link.springer.com/article/10.1007/BF02442476#page-1>, fecha de consulta: 19/08/2013.
- [26] Yun-Thai Li, *Pulse Oximetry*, disponible en <http://personal.ph.surrey.ac.uk/~phs3ps/surj/v2/li.pdf>, fecha de consulta: 19/08/2013.
- [27] Oxímetros de pulso (saturómetros), teoría de funcionamiento, disponible en <http://www.efn.uncor.edu/escuelas/biomedica/Plandeestudios/materias%20completas/Instrumentacion%20biomedica/Material/agosto%202010/Saturometros%202010.pdf>, fecha de consulta: 19/08/2013.
- [28] Hann M., Design Considerations for the analog front end of a pulse oximeter, disponible en <http://www.datasheetarchive.com/indexer.php?file=DSAUD0079027.pdf&dir=Datasheets-UD4&keywords=ECG+analog+mux&database=user-highscore#>, fecha de consulta: 22/08/2013.
- [29] Townsend N., *Pulse Oximetry*, disponible en http://www.robots.ox.ac.uk/~neil/teaching/lectures/med_elec/notes6.pdf, fecha de consulta: 22/08/2013.
- [30] Rabanal J., Monitorización de la pulsioximetría, disponible en <http://www.anestesiavirtual.com/menupulsio.htm>, fecha de consulta: 12/09/2013.
- [31] Arduino, *Reference*, disponible en <http://arduino.cc/en/Reference/AnalogRead>, fecha de consulta: 15/07/2013.
- [32] Igoe T., *Graph*, disponible en <http://arduino.cc/en/Tutorial/Graph>, fecha de consulta: 15/07/2013.

[33] UNAM, *Datos acerca de la ciudad de México*, disponible en http://www.cimu.unam.mx/espanol/mex_es.htm, fecha de consulta: 18/11/2013.

[34] CIMAS Internacional, *Buceo en Altitud*, disponible en <http://www.carreto.com/curso/Altitud.pdf>, fecha de consulta: 18/09/2013.

