

DISCUSION GENERAL

El presente artículo es una traducción del apartado introductorio de un documento (decolessons.txt) escrito originalmente por Erik C. Baker y muy difundido a través de Internet, realizada por Raimundo Fernández Díez, ingeniero.

§. INTRODUCCION

El documento completo describe de una manera clara los aspectos a tener en cuenta para la implementación básica del algoritmo ZH-L16 de Bühlmann. Además incluía un sencillo ejemplo en Fortran que ha sido la base de varios programas de descompresión como GAP o DekoPro.

La presente introducción se centra en aquellos aspectos que sitúan la historia de varios modelos descompresivos y el papel que juega dentro de este abanico el algoritmo de Bühlmann. Aunque ya ha pasado algún tiempo desde que se empezó a difundir este documento (y algunas cosas han cambiado) sigue siendo una referencia básica para aquellos interesados en saber un poco más como se calcula una descompresión.

§1. ASPECTOS GENERALES

En primer lugar, es evidente que antes de que nadie se dedique decididamente a programar un modelo de descompresión necesita hacer un poco de investigación sobre los fundamentos en los que se basa este. A nivel general cuando se habla de modelo de descompresión o modelo descompresivo, normalmente se hace referencia a una ligera variante del modelo de fase disuelta (Haldane) tal y como fue implementado por Bühlmann y/o otros. Desgraciadamente, la información relevante no está debidamente recopilada o centralizada en una única referencia práctica. Los libros de Bühlmann han sido lo más parecido a una referencia exhaustiva, pero, en cualquier caso, la información sigue siendo incompleta, especialmente para programar el modelo.

El trabajo de Bühlmann debe considerarse en el marco del contexto histórico del que deriva. Bühlmann no inventó la mayoría de los conceptos presentes en sus libros. Se basó en el trabajo realizado en este campo por otros antes que el y refinó (ligeramente) el modelo. La mayor parte del modelo de fase disuelta fue desarrollada por John S. Haldane, Robert D. Workmann (U.S. Navy) y Heinz R. Schreiner. Bühlmann se apoyó fuertemente en el trabajo de Robert Workman y se comunicaba frecuentemente con Schreiner, como colega, durante finales de los 60 y principios de los 70. Bill Hamilton cooperaba con Schreiner durante los primeros años. Workmann, Schreiner y Bühlmann ya han fallecido, pero Bill Hamilton sigue aun muy activo y es, probablemente, una de las mejores fuentes de información en temas de descompresión.

Los elementos clave del modelo actual de fase disuelta se basan, sin embargo, en unos pocos documentos de investigación de hace bastantes años. Estos documentos contienen el núcleo fundamental del modelo y sus bases. Esta es la información necesaria que cualquiera que desee realizar un programa de descompresión debe leer y saber. Las referencias bibliográficas son las siguientes:

1.- Boycott, A.E., Damant, G.C.C., & Haldane, J.S. "The Prevention of Compressed Air Illness" *Journal of Hygiene*, Volumen 8, (1908), pp. 342-443. [Este es el documento clásico de Haldane y asociados que significó el comienzo de la ciencia descompresiva. Haldane ofrece muchos detalles (muy adelantados a su tiempo) y solo unas pocas asunciones mal encaminadas. También se habla mucho de la descompresión en cabras. La mayor parte de todo esto sigue siendo de aplicación hoy en día. Una vieja copia de 1908 de "Journal of Hygiene", Volumen 8 se puede encontrar en la biblioteca de la mayoría de las universidades, especialmente las relacionadas con la medicina].

2.- Workman, Robert D. "Calculation of Decompression Schedules for Nitrogen-Oxygen and Helium-Oxygen Dives" Research Report 6-65, U.S. Navy Experimental Diving Unit, Washington, D.C. (26 May 1965). [Este documento esta disponible a través del "National Technical Information Service" (NTIS) o se puede pedir una fotocopia a través de la "Undersea & Hyperbaric Medical Society" (UHMS)].

3.- Schreiner, H.R., and Kelley, P.L. "A Pragmatic View of Decompression" *Underwater Physiology: Proceedings of the Fourth Symposium on Underwater Physiology*, edited by C.J. Lambertsen. Academic Press, New York, (1971) p 205-219. [Este documento esta disponible en la biblioteca de algunas universidades o se puede pedir una fotocopia a través de la "Undersea & Hyperbaric Medical Society" (UHMS)].

La razón por la que se deben leer estos documentos es para comprender el contexto histórico y el desarrollo del modelo de fase disuelta, lo cual es necesario para comprender la implementación de Bühlmann del modelo. Los puntos más importantes son los siguientes:

* Haldane estableció el concepto de varios compartimientos de "tejido" en el cuerpo en los cuales la absorción se producía de acuerdo a una exponencial encontrada en la naturaleza. Haldane también estableció el concepto de "criterio de límite de ascenso", que en su caso se basaba en ratios de supersaturación.

* Workman usó los datos de investigaciones de la U.S. Navy para establecer el concepto de "valores M" (M-values) como criterio de límite de ascenso. Estos se expresan como una relación lineal entre la supersaturación tolerada por el compartimiento de "tejido" y la presión ambiente. Los valores M de Workman se basan en la presión parcial del gas inerte en cuestión y no en la presión total del gas respiratorio. Workman explico el concepto de que los compartimientos con tiempos de semisaturación (half-time) más rápidos toleran mayores supersaturaciones que los más lentos. Workman también desarrolló un procedimiento de cálculo que es la base de los que se usan hoy en día. Un colega de Workman, William R. Braithwaite, modificó posteriormente este procedimiento para incluir el cálculo de la "presión ambiente tolerada" para poder averiguar la "primera parada".

* Schreiner explico el modelo de descompresión en términos fisiológicos actuales tales como transporte gaseoso en la sangre hacia los tejidos, solubilidad de los gases en los fluidos del cuerpo, porcentajes de grasa y composición de los compartimientos de "tejidos" y las presiones parciales alveolares de los gases. Estableció el concepto básico de que el total de la presión parcial de un gas inerte en un compartimiento es la suma de todas las presiones parciales de todos los gases inertes en ese compartimiento, incluso si tienen diferentes tiempos de

semisaturación. Otra de las principales contribuciones que hizo Schreiner fue la de resolver la ecuación diferencial del intercambio gaseoso cuando la presión ambiente cambia a velocidad constante. Esta es la solución general de la ecuación diferencial, de la cual la conocida ecuación instantánea es solo un caso particular. La solución general permite calcular directamente la presión parcial del gas inerte en un compartimento, en función del tiempo, para cualquier ascenso o descenso lineal o profundidad constante. También existen más incidencias en otros aspectos de la fisiología de la descompresión, incluyendo la base de la constante "k" de los tiempos de semisaturación (half-time).

Tal como se puede ver es en estos puntos, muchos de los elementos claves en el "algoritmo de Bühlmann" fueron, de hecho, desarrollados por otros y potenciados por Bühlmann. Por supuesto Bühlmann realizó a su vez un gran número de contribuciones propias a la ciencia y el cálculo descompresivo. Aunque sin duda, su mayor contribución fue la de publicar su libro, en cuatro ediciones desde 1983 a 1995, como lo más cercano a una referencia completa sobre cómo realizar cálculos descompresivos. Debido a que era el único libro fácilmente disponible se convirtió en la base de la mayoría de los ordenadores de descompresión y de muchos programas.

Los principales conceptos del modelo de Bühlmann, muchos de ellos explicados en la 4ª edición de su libro (Bühlmann, 1995), son los siguientes:

- * La variación de los tiempos de semisaturación entre dos gases es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de sus pesos moleculares. Esta es una relación muy conocida en química bajo el nombre de la ley de Graham. Particularmente es aplicable cuando los gases atraviesan una fina membrana porosa en un proceso llamado efusión que es un tipo de difusión.
- * La tolerancia a la sobrepresión o supersaturación en un compartimento se basa en el exceso de volumen de gas tolerado por el cuerpo en ese compartimento. La presiones parciales entre dos gases diferentes en el mismo compartimento variarán de acuerdo a sus solubilidades en el medio de transporte que lleva estos gases hasta el compartimento (plasma sanguíneo en este caso).
- * El valor M general para un compartimento con múltiples gases, cada uno de los cuales tiene su propio valor M diferente al resto, variará de acuerdo a la proporción de cada gas en el compartimento.

Los dos primeros conceptos pueden usarse para derivar juegos completos de tiempos de semisaturación y valores M para otros gases como el argón y el neón (aunque sus mayores solubilidades comparadas con las del nitrógeno y el helio respectivamente, no ofrecen ningún beneficio substancial para la descompresión en la mayoría de los casos).

Es necesario explicar los "valores M" de Bühlmann. En primer lugar, son valores M clásicos, tal como Workman los definió. Lo único que hizo Bühlmann fue simplemente modificar la ecuación lineal para adaptarla a su aplicación. Comenzó con la ecuación tradicional de un valor M de la forma :

$$y = m \cdot x + b$$

y la resolvió para x.

Esto resulta en:

$$x = (y - b)/m$$

Para eliminar "m", la pendiente, del denominador denominó "Coeficiente b" a la inversa de la pendiente.

Tradicionalmente los valores M se expresan (siguiendo la forma $y = m \cdot x + b$) como:

$$P = m \cdot (P_{amb}) + M_o$$

Donde :

- **P** es la presión parcial del gas inerte tolerada
- **m** es la pendiente
- **Pamb** es la presión ambiente
- **Mo** es el valor de la función a nivel de mar.

Lo que hizo Bühlmann fue expresar lo mismo en coordenadas de presión absoluta. El "Coeficiente a" de Bühlmann es la intersección de la recta cuando $P_{amb} = 0$ y el "Coeficiente b" de Bühlmann es la inversa de la pendiente.

Resulta extremadamente fácil convertir entre Valores M de Bühlmann y los valores M al estilo clásico de Workmann.

En la edición de 1995 de su libro "Tauchmedizin", Bühlmann muestra muchos detalles de la fisiología del buceo y habla sobre su experiencia sobre el terreno a lo largo de los años. Presenta muchos de los resultados de su investigación experimental. Al incidir en estos datos, también resalta algunas de las limitaciones del modelo.

Por ejemplo, muestra la presión parcial del compartimento calculado al final de una serie de inmersiones y los expresa como un porcentaje del valor teórico. A partir de estos datos, destaca el hecho de que en las series de prueba donde aparecen evidencias de DCS ("Decompression Sickness" o enfermedad descompresiva), los buceadores afectados se encuentran a un porcentaje menor que los valores M teóricos en términos de absorción de gas de los compartimentos durante el ascenso a superficie. Estos porcentajes varían normalmente entre el 90 % y el 97 %. La situación es peor en el caso de inmersiones repetitivas que Bühlmann confirma y sugiere, como medida cautelar, la aplicación de factores de reducción a las inmersiones sucesivas.

Una interpretación de los datos de Bühlmann es que sus valores M no representan una línea definida entre la "ausencia de síntomas" y "síntoma masivos", mas bien representa una línea entre un "limitado numero de síntomas" y "numero masivo de síntomas". Lo cual es consistente con la experiencia de la mayoría de modelos descompresivos que confirman que la línea de los valores M es una línea dibujada sobre una área gris difusa.

Este tipo de información obliga a los que modelen la descompresión, a partir de los valores de Bühlmann, a incorporar un mecanismo reductor de los valores M que sea consistente a lo largo del rango de presiones ambiente.

Uno de esos mecanismos se basa en la reducción del gradiente del valor M, es decir, en la reducción de la diferencia entre el valor M y la presión ambiente.

Otra buena referencia sobre descompresión, que no he mencionado anteriormente, es el Dr. Bruce Wienke. Ha publicado varios libros disponibles a través de Best Publishing Co. Es el autor del "Modelo de Burbuja de gradiente reducido" o RGBM (Reduced Gradient Bubble Model). Su excelente discurso sobre gradientes se centra, básicamente, en los modelos de física de burbujas, pero también es aplicable al modelo de fase disuelta.

