



FUNCIONAMIENTO DE UN ORDENADOR DE BUCEO

• FUNCIONAMIENTO DE UN ORDENADOR DE BUCEO

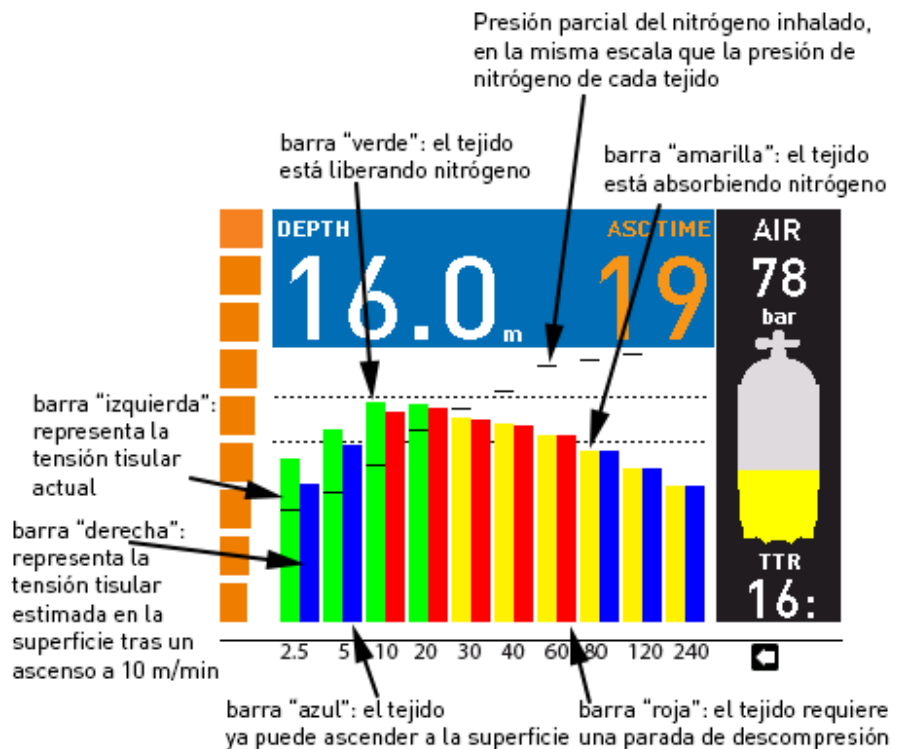
El algoritmo de descompresión de un ordenador de buceo es un intento de replicar los efectos de una inmersión en el cuerpo humano empleando fórmulas matemáticas. La absorción y liberación de nitrógeno se simula utilizando cierto número de los llamados compartimentos, cada uno de los cuales representa a un grupo de tejidos del cuerpo. Por ejemplo, tenemos un compartimento que representa a los músculos, otro que representa a los huesos, etc.

Los tejidos se identifican por su tiempo medio¹, un parámetro indicativo de la velocidad a la que se absorbe el nitrógeno. El algoritmo de Mares emplea diez tejidos, con los siguientes tiempos medios en minutos: 2,5, 5, 10, 20, 30, 40, 60, 80, 120 y 240. Los tejidos con tiempos medios cortos se denominan "rápidos", mientras que los tejidos con tiempos medios largos se denominan "lentos".

Cada tejido también se identifica por un segundo parámetro, el denominado valor M². Este valor representa la razón de la cantidad máxima de presión (también denominada tensión) con respecto a la presión ambiente que un determinado tejido puede tolerar. El término utilizado para describir el exceso de presión en un tejido con respecto a la presión ambiente es "supersaturación".

En esencia, un ordenador de buceo realiza un seguimiento de la absorción y liberación de nitrógeno en cada tejido, basándose en el perfil de tiempo-profundidad y en el tiempo medio de cada tejido. **El criterio de control para un ascenso seguro es que ningún tejido supere el valor M durante la inmersión o al salir a la superficie.** Si no se cumple este criterio, el ascenso es interrumpido por una o varias paradas de descompresión, durante las cuales el buceador puede liberar nitrógeno mientras se encuentra a una presión ambiente en la que se cumple el criterio de control.

En este documento, describimos cómo la presión de nitrógeno (también denominada tensión tisular) evoluciona durante una inmersión y cómo afecta a los cálculos de descompresión. Para este fin, utilizamos la nueva función de gráfico de tejidos del firmware 4.0 de Icon HD Net Ready, que permite seguir la evolución de la tensión en cada tejido "en vivo" durante la inmersión. La misma evolución de la tensión tisular se puede visualizar en un PC o Mac (utilizando DiveOrganizer o DivesDiary, respectivamente), tras haber descargado cualquier ordenador de buceo Mares compatible.



Los diez tejidos están representados en un eje horizontal, con los tiempos medios en ascenso de izquierda a derecha. Cada tejido está representado por dos barras verticales. La altura de la barra de la izquierda representa la carga instantánea calculada en cualquier momento dado en el tiempo. La altura de la barra de la derecha refleja el valor estimado tras un ascenso a la superficie a 10 m por minuto desde la profundidad actual. Esto es muy importante porque, durante un ascenso, el nitrógeno se sigue intercambiando y esto se debe tener en cuenta (resulta bastante obvio si tenemos en cuenta que un ascenso desde 40 m dura al menos 4 minutos, casi el doble que el tiempo medio del tejido más rápido y casi el tiempo medio total del segundo tejido más rápido).

En función del estado del tejido en un momento dado, la barra de la izquierda puede ser un poco más alta o un poco más baja que la barra de la derecha. Es más alta si el tejido está bastante lleno de nitrógeno y, durante el ascenso, comienza a liberar nitrógeno por la reducción de la presión. Es más baja si el tejido sigue estando bastante vacío y, en lugar de reducir la presión encontrada durante el ascenso, absorberá más nitrógeno del que liberará (obviamente, cada tejido liberará nitrógeno si está lo suficientemente cerca de la superficie). Tenga en cuenta que, para los tejidos lentos situados más a la derecha, debido a los tiempos medios largos, la diferencia durante un ascenso

es imperceptible y las dos barras que representan tejidos tendrán la misma altura.

El eje vertical del gráfico está normalizado de modo que el valor M está a la misma altura para cada tejido. Entonces dibujamos una línea horizontal a lo largo del gráfico en este valor. A esta línea la llamamos la línea "cero", en referencia a 0 m, es decir, la superficie. Permite una comprobación visual rápida: si cualquier una de las barras de la derecha supera esta línea durante la inmersión, significa que, en caso de ascender a la superficie en ese momento, el tejido correspondiente violaría el criterio de control (superaría el valor M). Por consiguiente, incurriríamos en una obligación de descompresión, es decir, deberíamos pasar algún tiempo por debajo de la superficie (a una presión superior a la presión ambiente de superficie, en la que se siguiese cumpliendo el criterio de control), donde podríamos liberar algo de nitrógeno a fin de reducir la altura de la barra hasta que vuelva a quedar por debajo de la línea cero. Para facilitar una comprensión inmediata del gráfico, las barras de la derecha pasan de AZUL a ROJO cuando cruzan la línea cero. Por tanto, una barra derecha de color ROJO indica una parada obligatoria de descompresión. Cuando se ha liberado suficiente nitrógeno como para que la barra vuelva a caer por debajo de la línea cero, su color vuelve a ser azul.

El gráfico presenta una segunda línea horizontal sobre la línea cero que conocemos como línea de los 3 m. Representa el criterio

¹ El nombre proviene de la definición de que, dentro de ese tiempo, un tejido reducirá la diferencia desde su estado inicial hasta el nuevo estado en la mitad. En dos tiempos medios, el tejido reduce la diferencia en un 75% (50% del 50% restante en el segundo tiempo medio), en un 87,5% en tres tiempos medios, en un 93,75% en cuatro tiempos medios, en un 96,875% en cinco tiempos medios y en un 98,44% en seis tiempos medios.

² En el algoritmo Mares RGBM, los valores M son dinámicos y se adaptan al perfil.

de control aplicado a una profundidad de 3 m. De forma similar a lo que hemos visto en relación con la línea cero, cualquier barra de la derecha que cruce esta línea implica que, si fuésemos a ascender en ese momento, estaríamos violando el criterio de control ya a 3 m. En otras palabras, en cuanto una barra de la derecha cruce esta línea, habremos incurrido en una obligación de descompresión a 6 m.³ Esta línea de razonamiento también se puede ampliar a una parada de 9 m o más, pero limitamos nuestra representación a estas dos líneas para no sobrecargar el gráfico.

Dado que los valores M no son los mismos para cada tejido (los tejidos más rápidos toleran una mayor supersaturación que los tejidos más lentos), y dado que todos los tejidos comienzan la primera inmersión con 0,79 atm de presión parcial de nitrógeno (tejidos en equilibrio con el aire en condiciones atmosféricas a nivel del mar⁴), resulta que, al principio de una primera inmersión, los tejidos de la izquierda son inferiores a los tejidos de la derecha⁵. Utilizamos el término "primera inmersión" para referirnos a una inmersión no sucesiva, de modo que no hay nitrógeno residual de una inmersión anterior que altere el panorama. Todo lo descrito a continuación también es aplicable para inmersiones sucesivas, por supuesto, con la única diferencia de que el punto de inicio no se encuentra con todos los tejidos a 0,79 atm de ppN₂, sino a un nivel superior, contabilizando lo que quedó de la inmersión anterior y del intervalo de superficie intermedio. No obstante, gráficamente resulta obvio porqué una inmersión sucesiva es más restrictiva que una no sucesiva: si existe nitrógeno restante de una inmersión anterior, cada barra estará más cerca de la línea cero al principio de la inmersión y, por tanto, para cada profundidad dada, habrá menos tiempo disponible antes de que una de ellas cruce el límite.

En correspondencia a cada tejido, el gráfico también presenta un pequeño segmento horizontal, superpuesto a la barra izquierda de cada tejido. La posición de este segmento a lo largo del eje vertical representa la presión parcial de nitrógeno en el gas inhalado. Durante una inmersión, verá cómo este segmento se moverá hacia arriba y hacia abajo al aumentar o disminuir la profundidad. En caso de cambio de gas, por ejemplo, de aire a nitrox al 80%, se producirá un salto brusco en la posición de este segmento.

La posición de este segmento a lo largo del eje vertical desempeña un papel importante en la comprensión de la dinámica de los tejidos, dado que la distancia entre este segmento y el extremo superior de la barra representa la diferencia en la presión parcial de nitrógeno en el tejido y en el gas inhalado, es decir, la fuerza impulsora del intercambio de gas. Esto también se denomina gradiente de presión. Si

están alejados, existen una fuerte absorción y liberación de nitrógeno (dentro de las limitaciones del tiempo medio). Si están cerca, el tejido está casi en equilibrio. Cabe tener en cuenta que, para interpretar el gráfico con mayor facilidad, cuando el segmento se encuentra POR ENCIMA de la barra y el tejido está absorbiendo gas (la presión parcial del gas inhalado es superior a la presión parcial del tejido), la barra es de color AMARILLO; cuando el segmento se encuentra DENTRO de la barra y, por tanto, el tejido está liberando gas (la presión parcial del gas inhalado es inferior a la presión parcial del tejido) la barra es de color VERDE.

• APLICACIÓN DEL GRÁFICO DE TEJIDOS A UNA INMERSIÓN CUADRADA

Utilizamos una inmersión cuadrada a 30 m durante 30 min porque, conceptualmente, es el perfil que describe más fácilmente los distintos aspectos presentados arriba. Analizamos el estado de saturación de todos los tejidos en 9 ejemplos en particular de la inmersión. Para ello, utilizamos los gráficos proporcionados por Icon HD durante la misma inmersión. Comenzamos con la situación al principio de la inmersión, ilustrada en la Figura 1. Vemos que todos los tejidos están bien por debajo de la línea cero y también vemos que el pequeño segmento que representa la presión parcial del gas inhalado está alineada con el extremo superior de cada barra (equilibrio en condiciones atmosféricas). En caso de inmersión con nitrox, el segmento estaría dentro de la barra, indicando el hecho de que respirar nitrox en la superficie llevaría a una liberación de nitrógeno inicial.

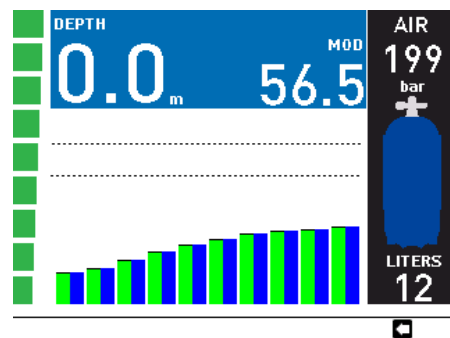
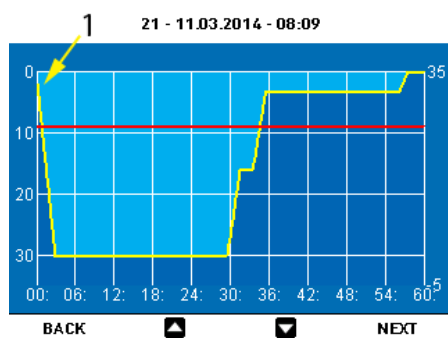


Fig. 1: Tensión tisular al comienzo de la inmersión.

En la Figura 2 vemos la situación al final del descenso: la altura de las barras ha aumentado ligeramente, dado que el nitrógeno ha sido absorbido a lo largo del descenso de un minuto y medio de duración. También podemos ver que los segmentos que representan la presión de nitrógeno en el gas inhalado se han desplazado hacia arriba, indicando que el gas se está forzando hacia el interior de los tejidos a una velocidad proporcional a la distancia entre cada segmento y el extremo superior de cada barra.

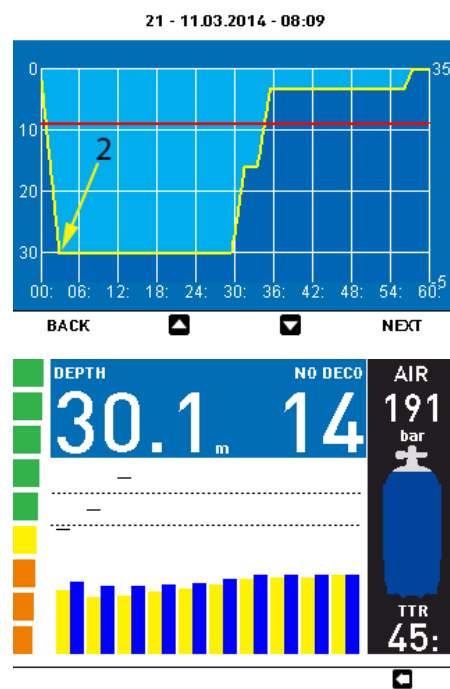


Fig. 2: Tensión tisular al final del descenso.

A una profundidad constante, la velocidad a la que un tejido libera gas disminuye a lo largo del tiempo, pues la diferencia de presión entre el gas inhalado y la saturación tisular disminuye. Esto se puede observar

³ Una parada de 6 m no significa que debamos parar a 6 m, sino que no podemos ascender hasta una profundidad de 3 m. De forma similar, una parada de 3 m no significa que debamos parar a 3 m, sino que no podemos ascender directamente a la superficie. El uso de incrementos de 3 m en la definición de las paradas de descompresión implica que, si nuestra carga de nitrógeno es incompatible con la presión ambiente a 3 m, tenemos que parar a 6 m hasta que liberemos el suficiente nitrógeno como para ser compatibles con la presión ambiente a 3 m.

⁴ Para inmersiones en lagos de montaña a altitudes elevadas, la presión atmosférica es inferior que al nivel del mar y se ajusta automáticamente en el ordenador de buceo. Los valores M para dichas inmersiones también cambian y se deben ajustar manualmente seleccionando la clase de altitud correspondiente en el ordenador de buceo.

⁵ Dado que la posición del valor M a lo largo del eje vertical ha sido definida para que sea la misma para todos los tejidos, la altura inicial de las barras de cada tejido es la altura de la línea cero, dividida por el valor M de el propio tejido.

gráficamente porque el segmento que simboliza la presión de nitrógeno inhalada no se mueve (dado que la profundidad es constante), mientras que la barra aumenta a medida que el nitrógeno es absorbido, de modo que ambos se acercan. Si el buceador permanece el tiempo suficiente a una profundidad constante, el tejido alcanzará el segmento⁶ y ya no tendrá lugar ninguna transferencia: se dice que el tejido está en equilibrio (o saturado). En la Figura 5 de abajo, podemos ver que, después de 30 minutos a 30 m, los tejidos de 2,5 y 5 minutos están saturados, mientras que los tejidos más lentos están más alejados de la igualdad de presión cuanto mayor es el tiempo medio del tejido.

En la Figura 3, vemos la situación en el minuto 18, justo antes del final de los límites fuera de la curva de seguridad: podemos ver que el tejido más rápido está prácticamente saturado (el segmento y el extremo superior de la barra coinciden), mientras que los tejidos muy lentos solo han aumentado un poco. Pero lo que más destaca en este ejemplo es el hecho de que la barra derecha del tercer segmento está a punto de tocar la línea horizontal. De hecho, en el paso de tiempo inmediatamente posterior, mostrado en la Figura 4, cruzará este límite.

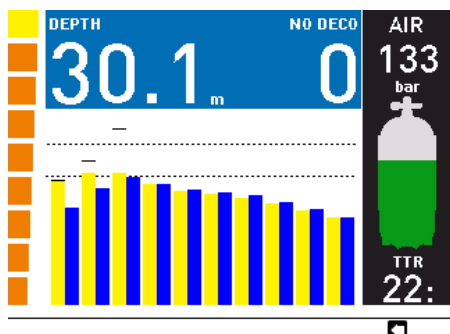
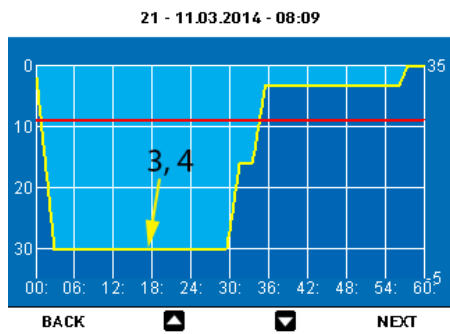


Fig. 3: Tensión tisular al final del límite fuera de la curva de seguridad.

En la Figura 4, el tercer tejido ha cruzado la línea cero. Tal y como se explica arriba, esto significa que este tejido, si se lleva a la superficie a 10 m/min, violará el criterio de

control y, por tanto, **nos encontraremos en el comienzo de la obligación de descompresión**. Para interpretar el gráfico con mayor facilidad, la barra cambia de azul a rojo. Lo que también es interesante es que la barra izquierda del segundo tejido también se encuentra sobre el límite, pero este tejido liberará el nitrógeno suficiente durante un ascenso normal como para no violar el criterio de control.

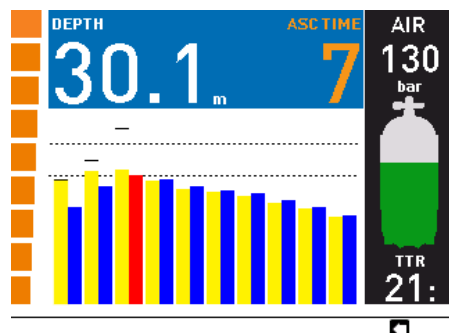
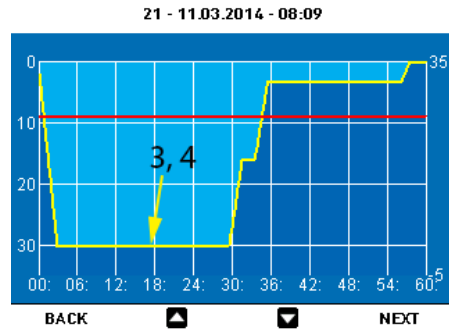


Fig. 4: Tensión tisular al comienzo de una obligación de descompresión.

Echemos un vistazo ahora al final de la sección a 30 m en la Figura 5: vemos que el criterio de control ha sido violado por 5 segmentos. Curiosamente, los dos primeros tejidos, ambos saturados ahora a una presión absoluta de 4 atm, liberarán el nitrógeno suficiente durante el ascenso para no violar nunca el criterio de control. En otras palabras, para inmersiones de hasta 30 m, los dos primeros tejidos nunca serán el factor limitador. También vemos que una reducción de la profundidad de 0,5 m es suficiente para hacer que los dos primeros tejidos pasen a la liberación de nitrógeno, lo que tiene sentido, ya que estaban saturados a 30 m y cualquier reducción de la presión llevará el segmento pequeño por debajo del extremo superior de la barra.

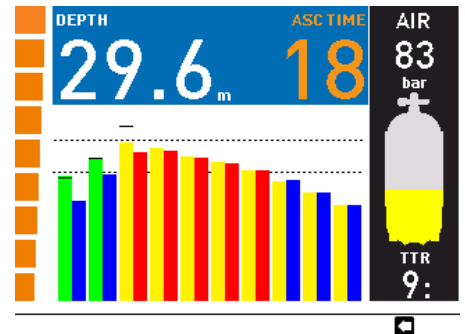
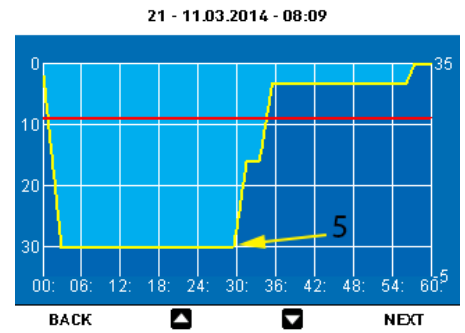
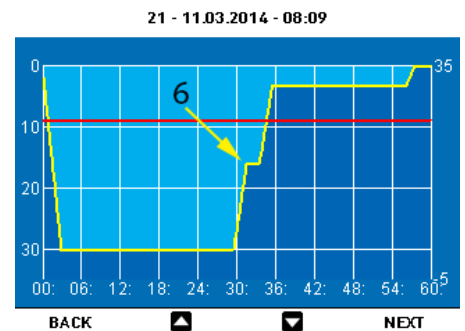


Fig. 5: Tensión tisular al comienzo del ascenso.

Ascendamos ahora hasta la profundidad de la parada profunda, Figura 6: vemos que los cuatro primeros tejidos están liberando nitrógeno bajo un gradiente apreciable (distancia entre el extremo superior de la barra y el segmento horizontal). La quinta barra sigue liberando nitrógeno, pero a un gradiente muy reducido. Solo desde el 6º gradiente en adelante sigue habiendo un gradiente considerable para la absorción de nitrógeno. Se trata del tejido de 40 minutos, de modo que una parada profunda de dos minutos en este punto apenas afectará al estado de su saturación. No obstante, los 2 minutos permitirán que los tejidos rápidos (y sensibles) se deshagan de una buena cantidad de gas mientras la presión ambiente sea relativamente alta, controlando así el crecimiento de microburbujas.



⁶ La igualdad de presión se alcanza asintóticamente pero, en términos prácticos, podemos considerar que esto sucede dentro de 6 tiempos medios.

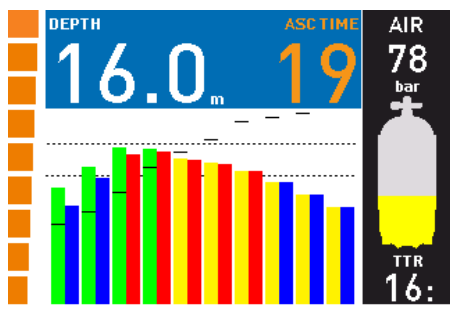


Fig. 6: Tensión tisular al comienzo de la parada profunda.

Desde el punto de vista del algoritmo, para este perfil, una parada profunda puede ser vista como ventajosa durante un ascenso. Esto se puede inferir de la Figura 7, que muestra la saturación de tejido al final de la parada profunda: las barras verdes han descendido marcadamente, mientras que casi nada ha cambiado en las barras amarillas.

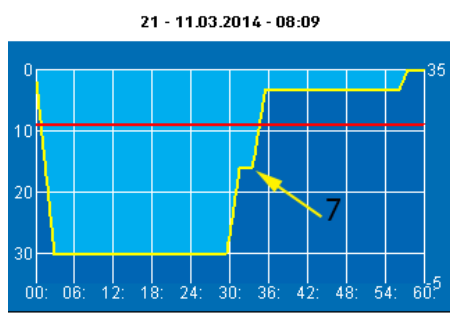


Fig. 8: Tensión tisular al comienzo de la parada de descompresión.

En la Figura 9, vemos la situación al final de la obligación de descompresión: todas las barras azules están ahora por debajo de la línea límite. No obstante, no existe margen de seguridad, pues las barras apenas cumplen el criterio para un ascenso seguro. Por eso es una buena idea realizar siempre una parada de seguridad de 3-5 minutos a 3-5 m, aunque sea al final de una inmersión fuera de la curva de seguridad.

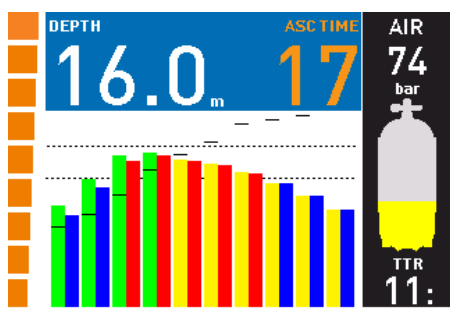


Fig. 7: Tensión tisular al final de la parada profunda.

Ahora procederemos a la profundidad de la parada de descompresión, Figura 8, y veremos que todos los tejidos, excepto el más lento, están liberando nitrógeno, y 5 de ellos siguen violando el criterio de control.

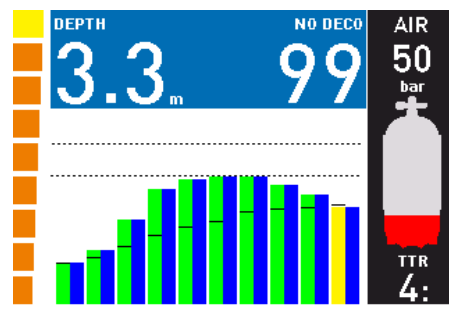
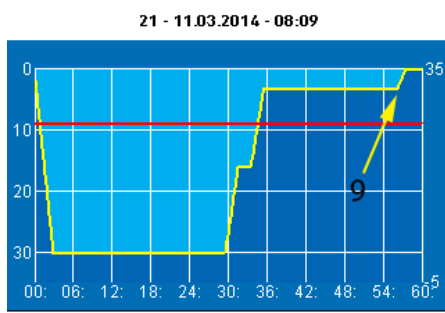
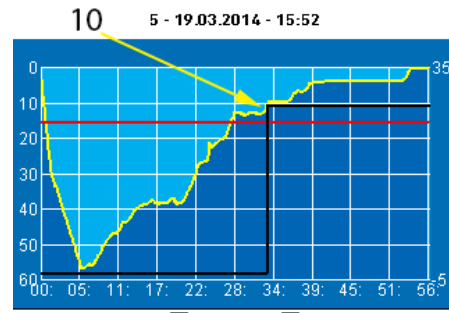


Fig. 9: Tensión tisular al final de la parada de descompresión.

• APLICACIÓN DEL GRÁFICO DE TEJIDOS A UN PERFIL DE INMERSIÓN REAL, INCLUYENDO UN CAMBIO A UN GAS DE DESCOMPRESIÓN CON ALTO CONTENIDO EN OXÍGENO.

Las Figuras 10 y 11 ilustran la situación durante una inmersión real en la que se realiza un cambio de gas de aire a nitrox al 80%. En particular, muestran la tensión tisular justo antes y justo después del cambio de gas. Es bastante obvio porque resulta tan ventajoso utilizar una mezcla de descompresión alta en O₂. La presión parcial de nitrógeno del gas inhalado se reduce significativamente, y no solo hay dos tejidos más liberando nitrógeno en lugar de absorbiéndolo, sino que los gradientes de presión para la liberación de nitrógeno han aumentado significativamente en los tejidos que ya estaban liberando nitrógeno.



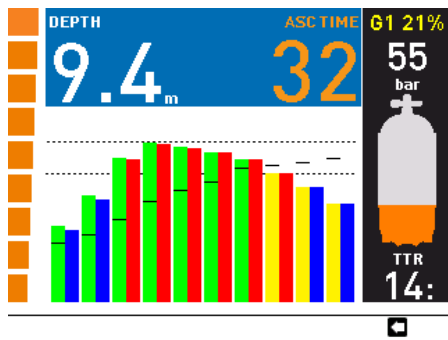


Fig. 10: Tensión tisular justo antes de un cambio de gas.

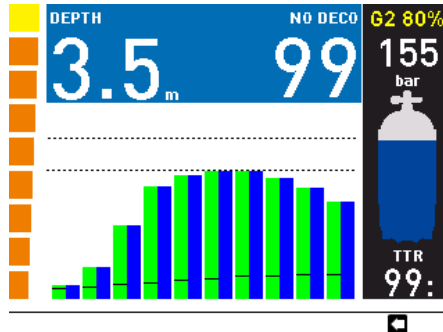
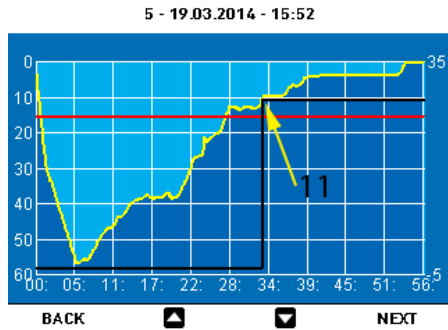
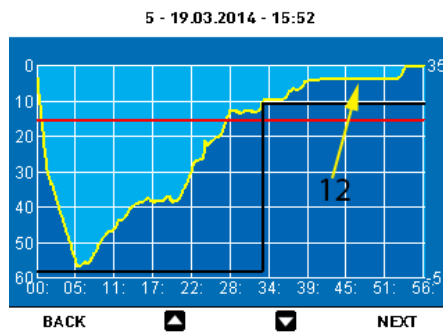


Fig. 12: Saturación tisular al final de la obligación de descompresión.

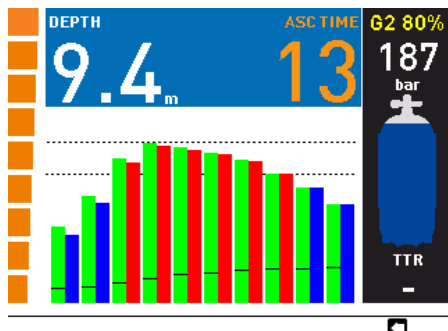
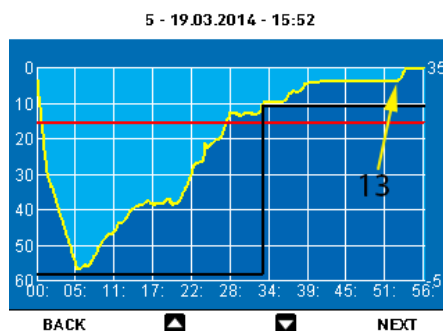


Fig. 11: Tensión tisular justo después de un cambio de gas.



Para la misma inmersión, la Figura 12 muestra la saturación tisular al final de la descompresión obligatoria y la Figura 13 muestra la saturación tisular 5 minutos más tarde. Las barras disminuyen todavía más y, cuanto más lejos están las barras de la línea horizontal inferior, más segura es la inmersión.

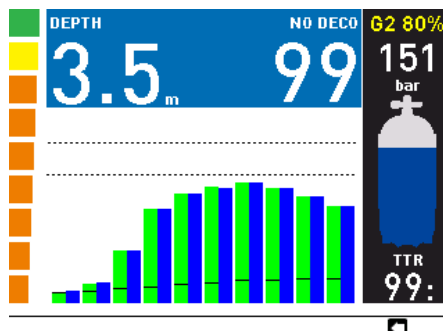


Fig. 13: Saturación tisular 5 minutos después del fin de la obligación de descompresión.