Casco subacqueo per registrazioni di segnali biologici.

Lucio Pastena * Fabio Faralli' Riccardo Gagliardi'' Massimo Melucci'' Lucio Ricciardi§

Riassunto - Il presente studio ha lo scopo di descrivere un innovativo device (casco subacqueo) utilizzato dagli operatori della Marina Militare durante le loro specifiche attività operative e di addestramento che consente di registrare e analizzare offline l'attività elettrica cerebrale e cardiaca. Esso mantiene lo scalpo perfettamente asciutto, evitando infiltrazioni d'acqua e addensamento di vapore acqueo all'interno. Inoltre adatta automaticamente la pressione interna a quella esterna, che varia secondo la profondità, mantenendo una leggera sovrapressione. Ciò è possibile poiché la stessa aria o miscela respiratoria utilizzata dall'operatore alimenta una guarnizione e un sistema di valvole (brevettato) che si adattano alle diverse profondità. Un'altra caratteristica è uno schermo pieghevole, da utilizzare quando previsto, che, proiettando una serie randomizzata di lampi rossi visibili dall'operatore, permette di registrare i potenziali evocati luminosi cognitivi (P300). Poiché il casco è composto di due parti, una visiera e una calotta, è molto facile controllare gli elettrodi e i circuiti prima dell'immersione.

Parole chiave: Elettroencefalografia, Elettrocardiografia, Holter, Casco subacqueo

Messaggi chiave:

- Il casco subacqueo denominato PASSOR sarebbe un'innovazione nel campo della medicina subacquea.
- Il Passor è indossabile da un operatore subacqueo e può eseguire esami EEG (attività elettrica cerebrale) ed. EKG (attività elettrica cardiaca) con registrazioni in immersione a diverse profondità.

Introduzione

Le attività subacquee sono sempre più diffuse per motivi ricreativi o di lavoro. Il progredire delle conoscenze fisiologiche sul corpo umano e il progresso delle attrezzature subacquee hanno reso possibile il raggiungimento di traguardi sempre più ambiziosi e sicuri. Tra questi: registrazioni elettroencefalografiche (EEG) a - 450 m e registrazioni EEG a - 250 m avvenute durante un'esperienza d'immersione in saturazione (1, 2).

E' da considerare che l'immersione in profondità con apparecchi di respirazione, sia un'attività da affrontare sempre con la massima cautela e con la conoscenza delle alterazioni, indotte nel corpo umano, provochi dall'aumento della pressione esterna e, di conseguenza, dalla respirazione di aria o ossigeno a pressioni maggiori di quelle presenti in superfice. Per questo, bisogna tener conto della tossicità sia nervosa, sia polmonare (3, 4) e della "high pressure nervous syndrome" (HPNS) dell'O_2 iperbarico (5, 6, 7).

E' noto che, dopo un certo periodo di respirazione con aria o miscele gassose contenenti azoto a pressioni superiori a 1 bar (pressione atmosferica di superficie), quest'ultimo, presente nei gas respiratori, diffonde, distribuendosi nel sangue e nei vari tessuti, per cui si rende necessario riemergere seguendo precise tabelle di decompressione, affinché l'azoto ritorni fisicamente disciolto nel sangue e non si formino bolle, che possono essere estremamente pericolose

* Prof. Associato Dip. Scienze Neurologiche, "Sapienza" Università di Roma
' CA (r) Servizio Sanitario COMSUBIN Marina Militare Italiana Le Grazie La Spezia
'' 1°Lgt Servizio Sanitario COMSUBIN Marina Militare Italiana Le Grazie La Spezia
§ Prof. associato di Fisiologia umana, Facoltà di Medicina e Chirurgia, Università degli Studi dell'Insubria (Varese)

Corrispondenza: E-mail: lucio.pastena@gmail.com

per lo svilupparsi di embolie.

È anche noto che, nelle immersioni, altre conseguenze nocive per l'organismo possono essere dovute alla maggior dispersione del calore nel corpo umano, nonostante la presenza d'indumenti protettivi, alla consapevolezza di trovarsi in un ambiente innaturale, che può divenire ostile, e ad altri fenomeni, ancora non completamente conosciuti, come la narcosi prodotta proprio dall'aumento di pressione dell'azoto (8, 9).

Per raggiungere una maggior conoscenza su questi fenomeni si compiono studi sia in superficie sia in camere iperbariche.

In questi studi i parametri fisiologici più ricercati per la loro importanza sono:

- L'elettrocardiogramma (EKG)
- L'elettroencefalogramma (EEG).

L'EKG descrive potenziali bioelettrici registrati sul torace dell'ordine di millivolt.

L'EEG descrive potenziali bioelettrici registrati sullo scalpo dell'ordine di microvolt.

La differenza dei voltaggi registrati rende la registrazione dell'EEG più difficoltosa rispetto alla registrazione dell'EKG; inoltre, è da considerare che i punti da cui si registrano i potenziali EEG siano molto vicini, essendo situati sullo scalpo (sono dell'ordine di meno di un centimetro), mentre i punti di registrazione dell'EKG sul torace sono più distanti e dell'ordine di più di un centimetro.

Queste differenze sono state importanti nello sviluppo delle tecniche di registrazione in medicina subacquea, dove si "dovrebbero" registrare i potenziali bioelettrici, sia sul torace, sia sullo scalpo, immersi in un mezzo dielettrico conduttore come l'acqua, che viene a essere ancor più conduttrice se trattasi di acqua marina a causa della presenza di cloruro di sodio (NaCl).

Le registrazioni di EKG su un torace immerso in acqua hanno perciò richiesto l'utilizzo di elettrodi stagni, ricoperti da una pellicola impermeabile. I segnali elettrocardiografici, fanno sì che i cavi, se ben collegati, e gli apparati di registrazione non creino problemi di diminuzione del segnale.

Queste particolarità hanno permesso la messa a punto di un sistema di registrazione EKG in acqua con o senza l'ausilio d'indumenti protettivi. È da considerare che questi ultimi, generalmente, permettano il passaggio di acqua fra il corpo e la superficie interna della muta (muta "bagnata"), acqua che non circola e quindi non raffredda il corpo, ma è pur sempre un mezzo conduttore.

In generale, per l'EKG è necessario collegare gli elettrodi stagni a un apparato di registrazione inserito in un contenitore impermeabile e presso-resistente, agganciato alla muta oppure alla cintura o alle spalle del subacqueo.

La registrazione in acqua dell'EEG è molto più complessa. Gli elettrodi di registrazione EEG sono molto vicini e, anche se si ricoprono di sostanza isolante, l'acqua scorre sullo scalpo, collegandoli elettricamente e rendendo così impossibile la registrazione dei dati. Per questa ragione, sino a epoche recenti, le registrazioni EEG si sono svolte in camera iperbarica (3, 4, 5).

Anche queste, però, annoverano molti problemi.

La camera iperbarica è una struttura d'acciaio in cui si può far variare sia la pressione ambientale sia la miscela respiratoria, per cui, nelle registrazioni, si possono studiare solo gli eventuali cambiamenti provocati dalle variazioni di questi due parametri; un ambiente, dunque, artefatto, che non rispecchiano quello subacqueo, in cui lavorano gli operatori, anche se esistono camere con estensione "bagnata".

La camera iperbarica è, in pratica, una gabbia di Faraday (10) che scherma i segnali, sia in ingresso sia in uscita. Per eseguire una registrazione, inizialmente era necessario condurre i segnali al di fuori della camera.

Una metodica che consentiva di condurre i segnali all'esterno consisteva nel praticare un passaggio a scafo, utilizzando una presa che avesse lo stesso numero d'ingressi, sia in entrata, sia in uscita. I collegamenti installati sulla presa sono immersi in una sostanza resinosa solida, resistente alla pressione; la presa, poi, inserita nella parete della camera, consente l'uscita dei segnali che sono registrati su di un'apparecchiatura esterna; ciò si rende necessario perché le apparecchiature di registrazione, alimentate a corrente alternata, non possono essere introdotte nella camera iperbarica per annullare il rischio d'incendio.

Un ulteriore problema consiste nella lunghezza dei cavi di trasmissione. Questi ultimi devono avere una lunghezza minima altrimenti, con il loro movimento, provocano correnti parassite che interferiscono con i segnali EEG.

L'introduzione di apparecchi di registrazione con estesa capacità di memoria ha sviluppato la tecnica Holter (10). Un registratore alimentato a batterie (corrente continua di basso voltaggio, 3,7 V) consente di seguire per molte ore segnali elettroencefalografici; esso può essere introdotto in camera iperbarica. Questa soluzione permette di minimizzare la lunghezza dei cavi e consente una registrazione in differita, da esaminare dopo l'apertura della camera.

La tecnologia Holter ha, però, un limite: quello di non permettere di controllare i dati in tempo reale, ma solo dopo che l'immersione in camera si sia conclusa. Tale limite è stato superato dall'impiego – nella camera iperbarica – della tecnologia "Blue-

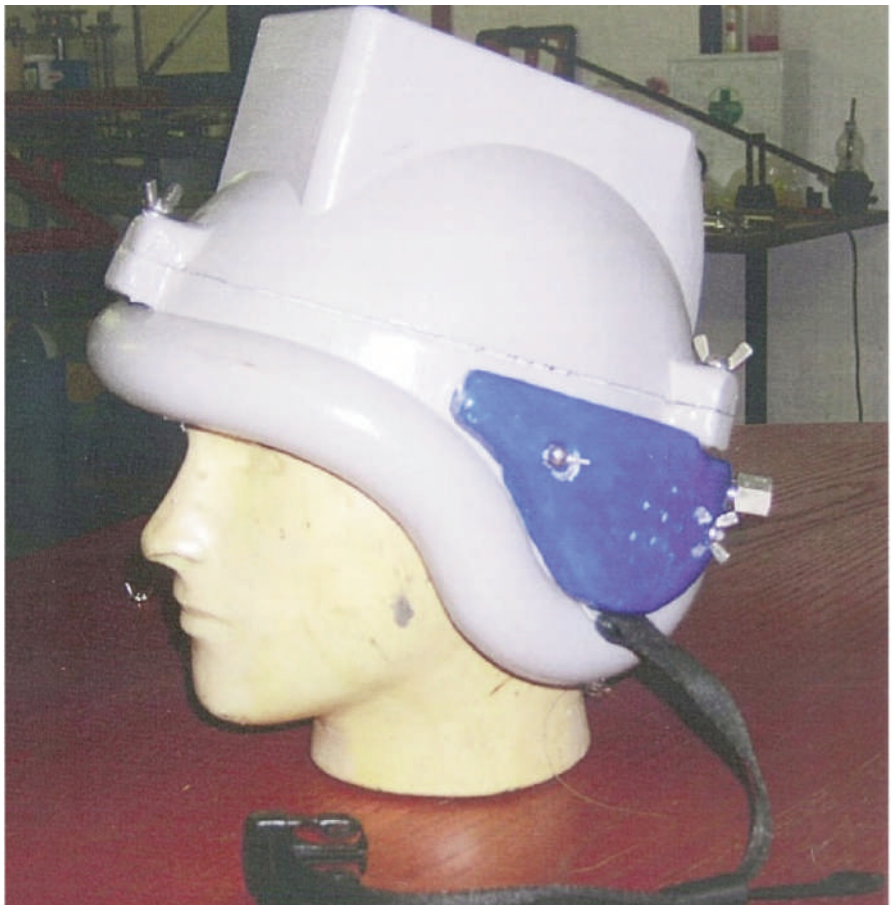


Fig. 1 - Casco chiuso.

Fig. 2 - Casco aperto.

tooth®". I segnali sono portati nell'ambiente esterno attraverso gli oblò, costituiti da materiale plastico resistente alla pressione. Tale tecnologia non richiede cavi (10) e, conseguentemente, sono annullate le correnti parassite. Inoltre, nonostante la camera iperbarica rappresenta, come detto, una gabbia di Faraday, i segnali EEG, amplificati e trasmessi all'esterno con questa tecnologia, possono essere registrati su computer situati al di fuori della camera, ottenendo un'ottima risoluzione.

I segnali EEG ed EKG, registrati in camera, sono di ottima qualità, anche perché lo spazio in cui si lavora è artificiale e non rispecchia le reali situazioni lavorative che si ritrovano in ambiente "umido".

Si può, così, facilmente dedurre che gli studi finora prevalentemente condotti, sono parziali e possono non rispecchiare la realtà operativa.

Per questa ragione si è voluto ideare un device che, unita alla tecnologia Holter e Bluetooth®, permettesse di registrare dati EEG ed EKG dell'operatore immerso realmente nel proprio ambiente lavorativo: l'acqua. La realizzazione di questo lavoro è stata possibile grazie a un finanziamento della Direzione Generale della Sanità Militare L-023 e seguenti.

Struttura, funzionalità e modalità di applicazione del Casco "PASSOR"

Innanzi tutto è da considerare che l'EEG debba essere registrato solo in un ambiente "secco" dove l'aria permette un isolamento ottimale fra i punti di registrazione. Per tale motivo, si è pensato a un casco impermeabile, in vetroresina, dove, con un opportuno sistema di valvole, scorra in continuo un flusso d'aria che renda lo spazio di registrazione asciutto e non umido. Si è utilizzata nello stesso casco la tecnica Holter ***(Fig. 1, 2, 3)***

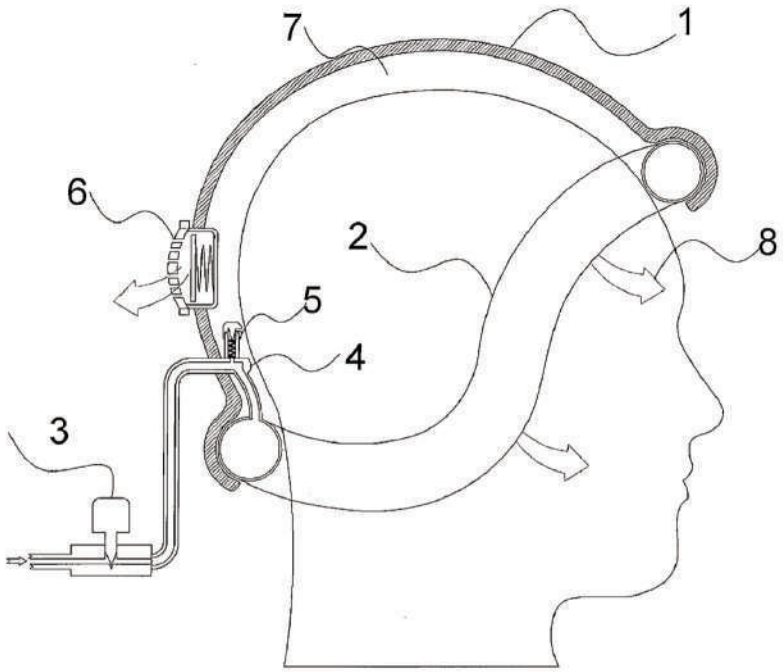


Fig. 3 - Helmet section with the different components:
1) protezione esterna
2) guaina di materiale morbido da adattare alla testa dell'operatore
3-4-5-6-7) sistema di valvole

che permette di avere una registrazione continua dei segnali che possono essere esaminati in differita alla fine del lavoro subacqueo. Inoltre con la tecnologia Bluetooth® (10) la bontà dei segnali può essere controllata prima dell'immersione senza l'ingombro di fili.

Questo ha portato alla risoluzione di vari problemi: il casco deve essere scomponibile in due parti per permettere una messa a punto degli elettrodi prima della registrazione (posizionamento corretto e rilevazione della loro resistenza).

In realtà il posizionamento corretto viene risolto ponendo, sempre nella stessa posizione, gli elettrodi in una cuffia precablata ***(Fig. 4),*** da far poi indossare all'operatore. Questa disposizione precostituita ha anche il vantaggio di rendere comparabili registrazioni di diversi operatori, perché eseguite con la stessa modalità. Nei modelli attuali di casco si è adoperata un'apparecchiatura Holter costruita per operare in ambienti clinici, quindi ingombrante; nei futuri modelli si potrà ovviare a questo inconveniente, avendo a disposizione un'apparecchiatura costruita ad hoc.

Il casco in questione, vagamente simile a un casco da motociclista, è realizzato in maniera da poter avere il viso libero, anche se protetto da occhiali, in modo da poter utilizzare un comune respiratore fornito di boccaglio; può, così, essere utilizzato da varie categorie di operatori subacquei, sia militari che civili, che operano con finalità diverse, ma adoperano sempre un erogatore ubicato a livello del viso.

Il casco, chiamato anche PASSOR, è indossabile da un operatore subacqueo e può eseguire esami EEG (attività elettrica cerebrale) ed EKG (attività elettrica cardiaca) con registrazioni in immersione a diverse profondità.

Esso permette di mantenere la calotta cranica perfettamente asciutta, evitando infiltrazioni di acqua dall'esterno e addensamenti di vapore acqueo all'interno. Inoltre adegua in modo automatico la pressione interna a quella esterna, che varia secondo la profondità cui si scende, mantenendo all'interno una leggera sovrappressione per mezzo di un flusso continuo di aria asciutta. Il flusso è fornito dalla stessa bombola che alimenta l'erogatore per la respirazione, in dotazione al subacqueo.

La versione attuale è un prototipo, costruito artigianalmente e recentemente migliorato con una nuova guarnizione pneumatica, appositamente costruita, e con nuovi elementi interni. Si potrà arrivare a un prodotto standardizzato, appena si avrà le adeguate risorse.

La parte bassa, ad anello, accoglie in una scanalatura la guarnizione pneumatica, un supporto ad arco per il fissaggio del registratore e vari innesti, valvole e interruttori, per le diverse funzioni. S'indossa, dopo la cuffia con elettrodi precablati ***(Fig. 4, 5)*** e si posiziona con la guarnizione appena al di sopra delle orecchie per poi essere spinta più in basso.

Il PASSOR è diviso in due parti, per facilitare la messa a punto degli elettrodi.

E' importante:

- Il collegamento al registratore
- La posizione corretta della guarnizione intorno alla testa.

La guarnizione sarà mantenuta in pressione da un flusso d'aria continuo, sempre proveniente dalla bombola; il flusso sarà dosato con una manopola di regolazione fine. L'aria in eccesso sarà scaricata all'interno del casco da un ugello tarato e garantirà una leggera sovrappressione, controllabile da una

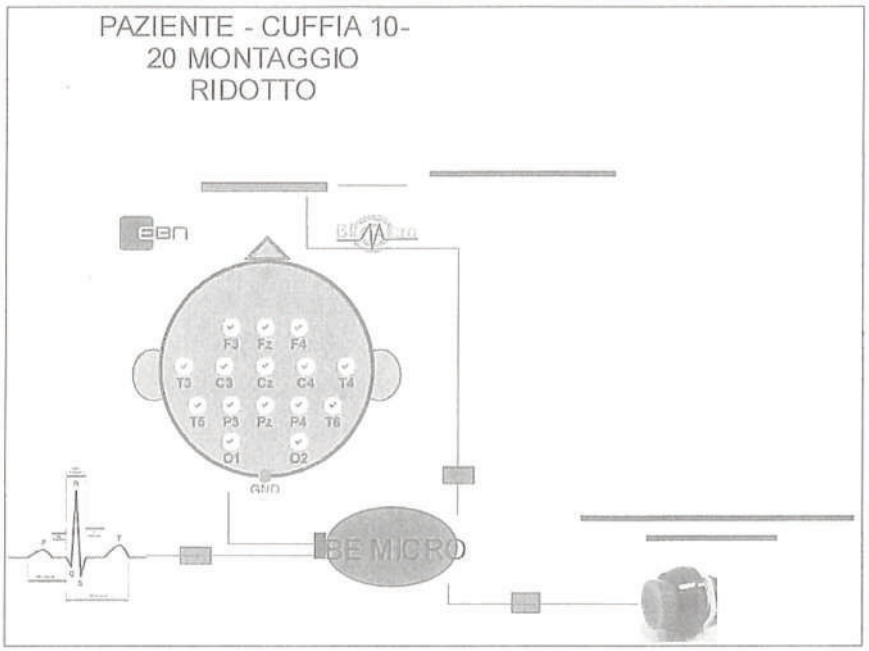


Fig. 4 - Cuffie ridotte.

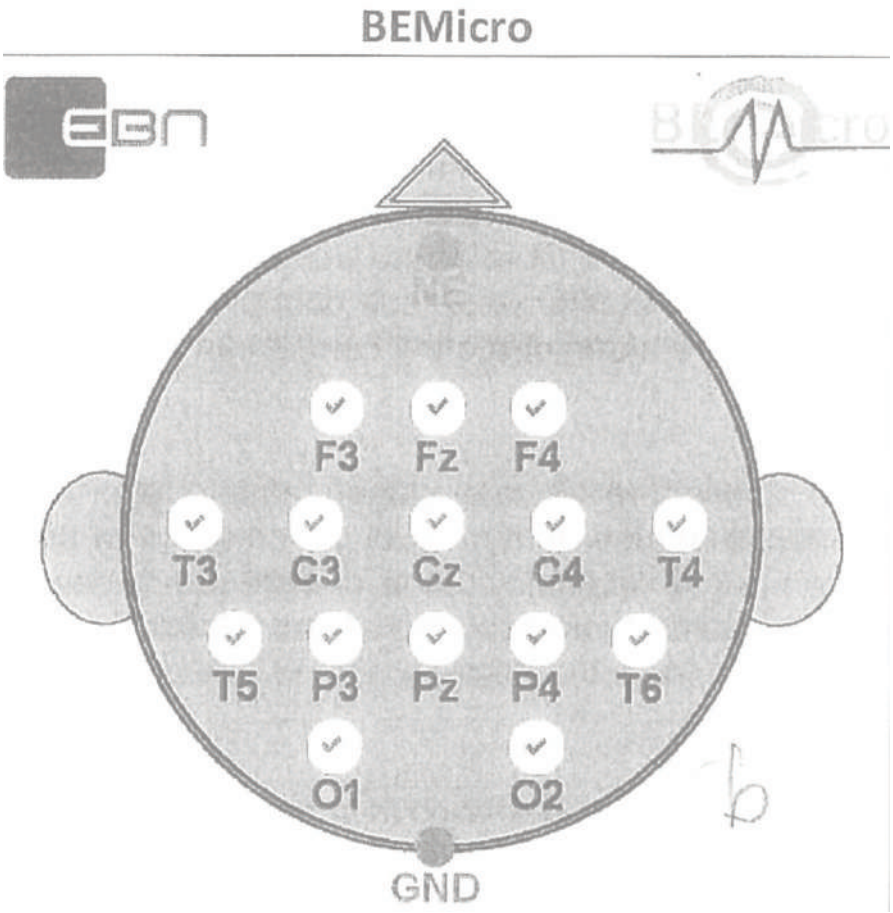


Fig. 5 - Schema di registrazione P300

valvola tarabile situata nella parte superiore del casco. Prima di chiudere, in modo ermetico, grazie a un O-ring, il casco, con la sua parte superiore, si potrà verificare, collegandosi alle apparecchiature di controllo, il corretto funzionamento di tutti i componenti elettronici.

Il casco, a causa degli ingombri del registratore (registratore BE-micro EBNeuro Firenze) e dei suoi collegamenti, ha un volume interno che in immersione genera una spinta positiva fastidiosa. Per ovviare a questo inconveniente, il casco PASSOR è dotato di zavorre in piombo che si applicano prima di scendere in acqua.

La pressione della guarnizione pneumatica e quella interna del casco vanno mantenute costanti con il flusso continuo regolato dalla manopola di alimentazione.

È noto che scendendo in profondità la pressione esterna aumenta, anche in modo considerevole, ma essendo quell'interna alimentata dal regolatore di pressione primo stadio (dell'erogatore) si adegua e aumenta in modo automatico, quindi non sarà necessario agire ulteriormente sulla manopola; si avrà così sempre la guarnizione gonfiata in modo adeguato e una sovrappressione interna al casco che manterrà l'ambiente interno asciutto e impedirà eventuali piccole infiltrazioni dall'esterno.

Quando si passerà da una profondità d'immersione alla superficie o a una profondità minore il sistema di valvole sopra descritto provvederà a scaricare all'esterno l'eccesso di pressione, senza creare danni all'operatore. Il sistema di valvole è coperto dal brevetto numero 202017000027263, del 14/03/2017 denominato *"Sistema di valvole regolabili e coordinate, applicabili a un casco indossato da un operatore subacqueo".*

Il casco può essere anche dotato di un

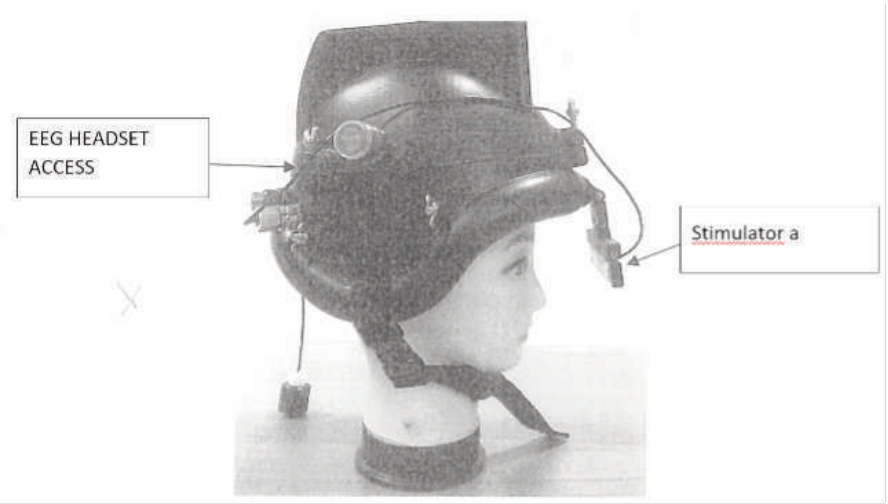


Fig. 6 - Casco con sistema di registrazione P300.

piccolo schermo a led ***(Fig.6),*** attivato da un tasto per registrare in acqua un potenziale cognitivo P300 (11) evocato da stimoli luminosi.

La scheda di controllo dello stimolatore visivo è dotata di diversi programmi e alloggiata nel supporto del registratore BE Micro. La cuffia impiegata è uguale a quella usata per registrazioni standard EEG.

Per un uso corretto dell'attrezzattura devono essere seguiti i seguenti passaggi:

1 indossare la cuffia con gli elettrodi;
2 indossare la parte inferiore del casco, con la guarnizione sgonfia, e assicurarsi che gli elettrodi non si siano spostati;
3 gonfiare leggermente la guarnizione pneumatica e assicurarsi che si adatti bene alla testa. La guarnizione non dovrà coprire le orecchie ma dovrà essere spinta il più in basso possibile rimanendone sopra;
4 collegare gli elettrodi con la pelle sottostante iniettando del gel con una siringa;
5 inserire nelle apposite sedi il ponticello porta-registratore, collocare il registratore nella sua sede e collegarlo con i fili della cuffia connettendolo al computer esterno per verificare che tutto funzioni.

Durante queste operazioni la guarnizione dovrà essere tenuta gonfia, con un flusso continuo di modo che rimanga solidale con la testa. L'aria in eccesso sarà smaltita all'esterno attraverso l'ugello calibrato. A questo punto si potrà chiudere il casco con la calotta superiore e le viti a galletto. Assicurarsi che l'aria in eccesso, che andrà a riempire l'interno del casco esca dalla valvola di sovrappressione, che è regolabile in modo sufficiente a mantenere una pressione interna lievemente superiore all'esterno, ma non eccessivamente.

Grazie al sistema brevettato di coordinamento di valvole di carico e scarico si potrà scendere in profondità e risalire senza problemi perché le pressioni interne si adegueranno automaticamente a quelle esterne.

Per eseguire una buona manutenzione dopo le immersioni, specialmente se in acqua salata, è necessario risciacquare bene con acqua dolce, asciugare e ungere con grasso apposito gli *O-ring* e tutte le parti in metallo interne ed esterne per proteggerle dalla corrosione.

Prospettive future per la pratica clinica

Il casco PASSOR è una tecnologia adatta al rilevamento di parametri biologici in ambienti a diverse profondità e, quindi, molto utile per studiare l'adattabilità umana.

I segnali bioelettrici registrati (EKG ed EEG) ***(Fig.7)*** insieme con i potenziali evocati visivi P300 possono essere implementati con l'aggiunta di altri parametri biologici come la saturazione dell'O_2, la temperatura cutanea, lo spirogramma e altri valori ematici per avere un quadro più completo delle condizioni psicofisiche degli operatori e prevenire così eventuali incidenti subacquei. Inoltre l'attrezzatura così concepita permette di osservare le variazioni delle diverse costanti biologiche provocate da varie miscele respiratorie alle diverse quote. Un'applicazione importante può essere lo studio delle variazioni dei diversi pattern dopo particolari esercizi per avere una compatibilità fra questi e lo stato psicofisico degli operatori. Inoltre, molte attrezzature subacquee possono essere valutate anche in base alle risposte biologiche degli operatori e così ottimizzate anche da questo punto di vista. Sino ad ora si è potuto studiare in camera iperbarica solo l'influenza delle variazioni pressorie (simulando così le varie profondità) (3, 4, 5) mentre con il PASSOR si può avere un quadro più esauriente e completo.

In acqua sono molteplici le variabili (isolamento degli operatori con difficoltà di comunicazione, diverse condizioni di temperatura e pressione, variabilità dell'illuminazione ecc.); tutti questi parametri hanno una notevole influenza sulle condizioni psicofisiche degli operatori e quindi vanno attentamente osservato e studiate. L'unica limitazione del PASSOR

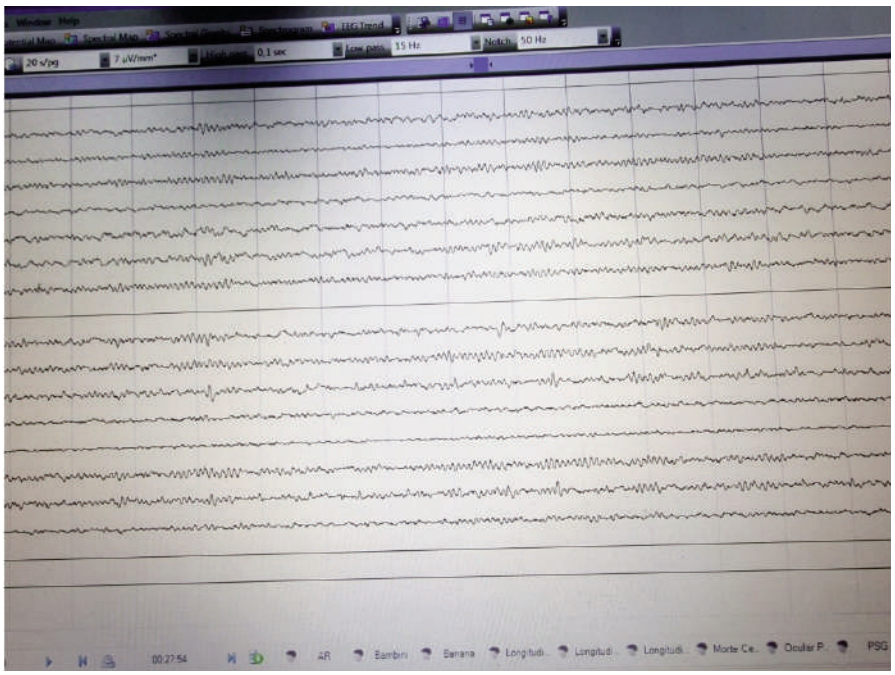


Fig. 7 - Esempio di registrazione EEG in acqua a quota - 3 metri.

che abbiamo costatato allo stato attuale, è che le registrazioni non sono disponibili in tempo reale, ma sono registrate su una memoria a stato solido e sono analizzabili solo successivamente (offline); in futuro, con lo sviluppo della tecnologia, si potrà ovviare a tale inconveniente collegando il sistema casco ad apposite stazioni di rilevamento per monitorare in tempo reale le condizioni degli operatori, prevenendo così eventuali situazioni di pericolo.

Con le opportune semplificazioni il sistema casco può essere usato anche in ambiente aereo sia per seguire condizioni di lavoro a rischio (sentine di navi, interno di cisterne, cabine di pilotaggio di mezzi pesanti etc.) sia per gli stessi scopi descritti per l'ambiente subacqueo. È ovvio che il sistema casco, per essere immediatamente operativo, debba essere fornito di sistemi automatici di valutazione statistica dei risultati per permettere la loro rappresentazione e dare così completezza al sistema.

Bibliografia

1. **Jain KK.** *High-pressure neurological syndrome (HPNS): Acta Neurol. Scand. 1994 90 (1), 45-50*

2. **Arieli R., Yalov A., Goldenshluger A.** *Modelling pulmonary and CNS O_2 of toxicity and estimation of parameters for humans. J. Appl.Physiol. 1985 92 (1), 248-256*

3. **Pastena L., Mainardi G., Faralli F., Matarese D., Gagliardi R.** *Le performances elettro encefalografiche durante un esperienza in saturazione (- 250 mt.) Giorn. Med. Militare 1995 luglio-agosto;145(4) 433-440*

4. **Rostain JC., Gardette-Chauffour MC., Lemaire C., Naquet R.** *Effects of a H_2-He-O_2 on the HPNS up 450msw. Undersea Biomed. Res. 1988 15(4), 257.270*

5. **Pastena L., Formaggio E., Storti SF., Faralli F., Melucci M., Gagliardi R. et al.** *Tracking EEG changes during the exposure to hyperbaric oxygen Neurophysiol. 2015 feb;126 (2):339-47*

6. **Storti SF., Formaggio E., Pastena L., Melucci M., Ricciardi L., Faralli F. et al.** *Expertise-related global efficiency of functional brain networks in professional and new divers under simulated deep-water. IEEE Trans neural Syst. Rehabil. Eng. 2019 Jan 24*

7. **Formaggio E., Storti SF., Pastena L., Melucci M., Ricciardi L., Faralli F. et al.** *How expertise Changes Cortical Sources of EEG Rhythms and Functional Connectivity in Divers Under Simulated Deep-Sea Conditions. IEEE Trans neural Syst. Rehabil Eng 2019 27(3) 450-456*

8. **Pastena L., Faralli F., Mainardi G., Gagliardi R.** *EEG patterns associated with nitrogen narcosis (breathing air at 9 ATA) Aviat. Space Environ. Medicine 2005 76 1031-1036*

9. **Vrijdag XCE, van Waart H., Pullon RM., Sames C., Mitchell S.J, Sleigh JW.** *EEG functional connectivity is sensitive for nitrogen narcosis at 608 kPa. Nature Portfolio 2022 12, 4880*

10. **Pastena L., Formaggio E., Faralli F., Melucci M., Rossi, Gagliardi R. et al.** Bluetooth Communication Interface for EEG Signal Recording in Hyperbaric Chambers IEEE Trans Neural Syst. Rehabil. Eng. 2015 Jul; 23 (4): 538-47

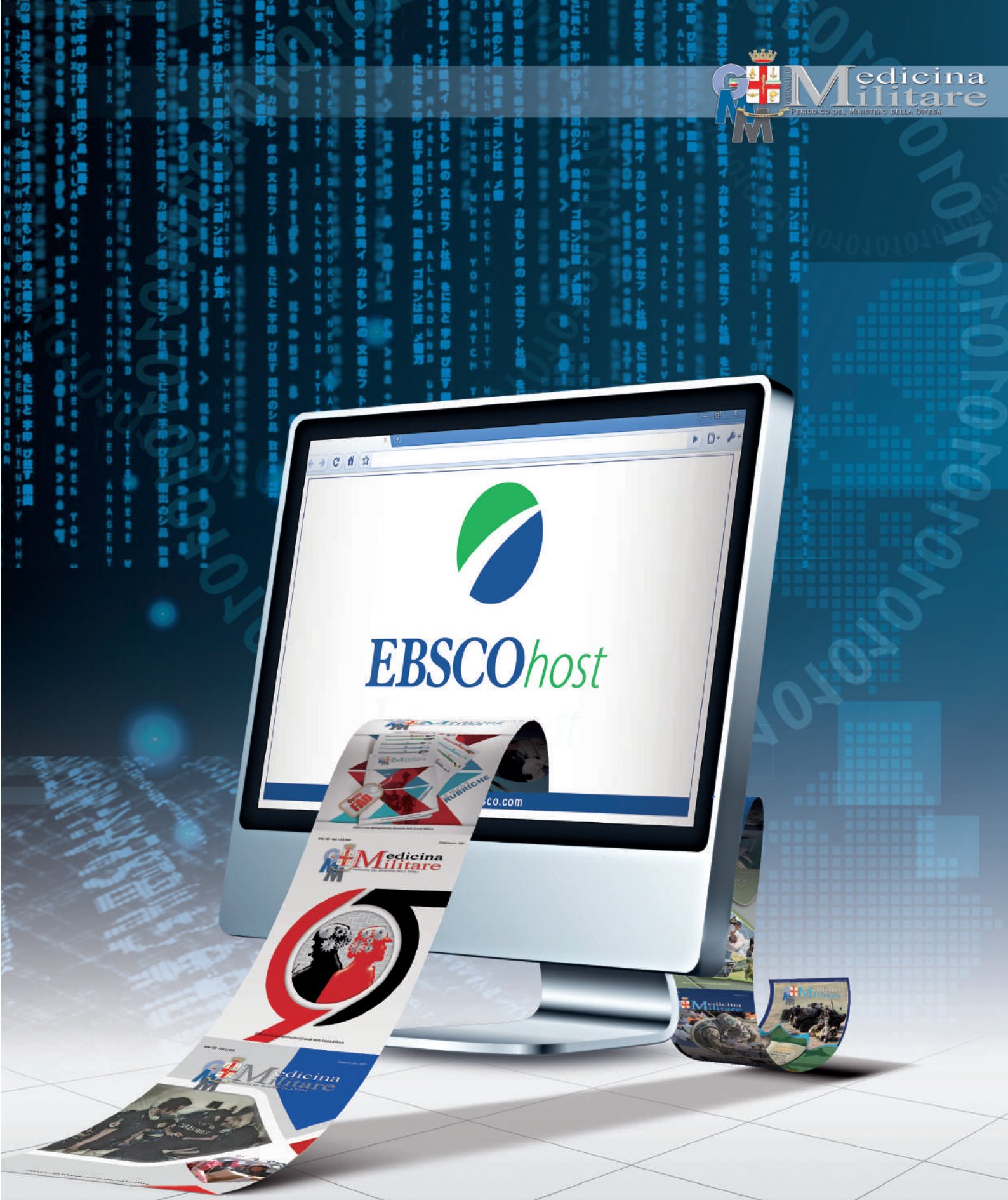
11. **Chiappa KH.** Evoked potentials in clinical medicine, (2nd ed.) Raven Press, New York 1990.

Disclosures:

L' Autore dichiara nessun conflitto di interessi.

Articolo ricevuto il 04/07/2023; rivisto il 11/12/23; accettato il 18/12/23.

Giornale di Medicina Militare
Periodico del Ministero della Difesa



Il Giornale di Medicina Militare sarà consultabile anche attraverso la piattaforma EBSCOhost

PERSPECTIVE

Diving helmet for biological signal recording.

Lucio Pastena * Fabio Faralli' Riccardo Gagliardi'' Massimo Melucci'' Lucio Ricciardi§

Abstract - The aim of this study is to describe an innovative device (diving helmet) used by Navy operators during their specific operational and training activities, which allows them to record and analyse brain and heart electrical activity offline. It keeps the scalp perfectly dry, preventing water infiltration and water vapour build-up inside. It also automatically adapts internal pressure to external pressure, which varies with depth, maintaining a slight positive pressure. This is possible because the same air or breathing mixture used by the operator feeds a patented gasket and valve system that adapts to different depths. Another feature is a collapsible screen, which can be used when necessary, to record visual cognitive evoked potentials (P300) by projecting a random series of red flashes visible to the operator. As the helmet is in two parts, a visor and a cap, it is very easy to check the electrodes and circuits before diving.

Keyword: Electroencephalography, Electrocardiography, Holter, Diving Helmet

Key message:

- The underwater helmet called PASSOR would be an innovation in the field of underwater medicine.
- Passor is wearable by a dive operator and can perform EEG (electrical brain activity) and ECG (electrical cardiac activity) examinations with underwater recordings at different depths.

Introduction

Diving activities are becoming increasingly popular for both recreational and professional reasons. Advances in physiological knowledge of the human body and advances in diving equipment have made it possible to achieve increasingly ambitious and safe goals. These include electroencephalographic (EEG) recordings at - 450 m and - 250 m during saturation diving (1, 2).

It must be remembered that deep diving with breathing apparatuses is an activity that must always be approached with the utmost caution and with an understanding of the changes that occur in the human body as a result of the increase in external pressure and, consequently, the inhalation of air or oxygen at pressure higher than those found at the surface. Both nerve and lung toxicity (3, 4) and the 'high pressure nervous syndrome' (HPNS) of hyperbaric O_2 must be considered (5, 6, 7).

It is well known that after a certain period of breathing air or gaseous mixtures containing nitrogen at pressure above 1 bar (surface pressure), the nitrogen present in the breathing gases diffuses and distributes itself in the blood and in the various tissues. At this point, it is necessary to resurface according to precise decompression tables so that the nitrogen returns physically dissolved in the blood and bubbles do not form, which

* Associate Professor, Neurological Sciences Department, Università di Roma "La Sapienza"
' Rear Admiral, Scuba Raiders Group, Medical Service, Italian Navy, Le Grazie, La Spezia
'' Warrant Officer 1, Scuba Raiders Group, Medical Service, Italian Navy, Le Grazie, La Spezia
§. Associate Professor of Human Physiology, Faculty of Medicine and Surgery, Università degli Studi dell'Insubria (Varese)

Corresponding E-mail: lucio.pastena@gmail.com

can be extremely dangerous for the development of embolisms.

It is also known that diving can have other harmful effects on the body, due to the greater heat dispersion in the human body, despite the presence of protective clothing, the perception of being in an unnatural environment that can become hostile, and other phenomena not yet fully understood, such as narcosis, which is caused precisely by the increase in nitrogen pressure (8, 9).

To gain a better understanding of these phenomena, studies are carried out both on the surface and in hyperbaric chambers.

The physiological parameters most sought after in these studies, because of their importance, are:

- the electrocardiogram (ECG)
- the electroencephalogram (EEG).

The ECG describes bioelectrical potentials recorded on the chest in the order of millivolts.

The EEG describes bioelectrical potentials recorded on the scalp in the order of microvolts.

The difference in the voltages recorded makes the EEG more difficult to record than the ECG; moreover, the points from which the EEG potentials are recorded are very close together on the scalp (they are of the order of less than one centimetre), whereas the points from which the ECG is recorded on the chest are further apart and are of the order of more than one centimetre.

These differences have been important in the development of recording techniques in underwater medicine, where bioelectric potentials are "supposed" to be recorded, either on the chest or on the scalp, immersed in a conductive dielectric medium such as water, which is even more conductive when it is seawater due to the presence of sodium chloride (NaCl).

ECG recordings on a chest submerged in water therefore require the use of waterproof electrodes covered with an impermeable film. The electrocardiographic signals, if well connected, and the recording equipment do not cause problems of signal attenuation.

These characteristics have made it possible to develop an ECG recording system in water, with or without protective clothing. The latter generally allows water to pass between the body and the inner surface of the wetsuit ("wet" wetsuit); water that does not circulate and therefore does not cool the body, but is still a conductive medium.

In general, ECG requires waterproof electrodes to be connected to a recording device, which is placed in a waterproof and pressure-resistant container attached to the wetsuit or to the diver's belt or shoulders.

Recording EEG in water is much more complicated. EEG recording electrodes are very close together, and even if they are covered with an insulating substance, water flows over the scalp, electrically connecting them and making data recording impossible. For this reason, until recently, EEG recordings have been made in a hyperbaric chamber (3, 4, 5). However, there are many problems with this method.

A hyperbaric chamber is a steel structure in which both the ambient pressure and the breathing mixture can be varied, so that only the changes caused by variations in these two parameters can be studied in the recordings. It is an environment that is therefore artefactual and does not reflect the underwater environment in which the operators work, although 'wet' chambers do exist.

A hyperbaric chamber is, in practice, a Faraday cage (10) that screens both incoming and outgoing signals. To make a recording, it was first necessary to conduct the signals outside the chamber. One method of conducting the signals externally was to make a hull passage, using a socket with the same number of inputs and outputs. The connections installed on the socket are immersed in a solid, pressure-resistant resin substance; the socket is then inserted into the wall of the chamber to allow the output of signals that are recorded on external equipment. This is necessary because the recording equipment, which is powered by alternating current, cannot be introduced into the hyperbaric chamber to eliminate the risk of fire.

A further problem lies in the length of the transmission cables. The latter must be of a minimum length otherwise, with their movement, they cause eddy currents that interfere with the EEG signals.

The introduction of recording devices with extended storage capacity has led to the development of the Holter technique (10). A battery-powered recorder (low-voltage direct current, 3.7 V) allows electroencephalographic signals to be followed for many hours and can be inserted into the hyperbaric chamber. This solution minimises cable lengths and allows a delayed recording to be examined after the chamber has been opened.

However, Holter technology has one limitation: it does not allow data to be checked in real time, but only after immersion in the chamber has ended. This limitation has been overcome by using Bluetooth® technology in the hyperbaric chamber. Signals are transmitted to the outside world through portholes made of pressure-resistant plastic. This technology requires no cables (10) and therefore eliminates eddy currents. In addition, although the hyperbaric

chamber is a Faraday cage, the EEG signals amplified and transmitted externally by this technology can be recorded on computers located outside the chamber, with excellent resolution.

The EEG and ECG signals recorded in the chamber are of very good quality, partly because the working space is artificial and does not reflect real working situations in a 'wet' environment.
It is therefore easy to conclude that the studies carried out so far are mainly partial and may not reflect the operational reality.
For this reason, it was decided to develop a device that, in combination with Holter and Bluetooth® technology, would make it possible to record the EEG and EKCG data of the operator who is truly immersed in his or her working environment: water. This work was made possible thanks to a grant from the Inspectorate General of Military Medical Services L-023 et seq.

Structure, functionality and method of application of the 'PASSOR' helmet

Firstly, it should be noted that EEG should only be recorded in a dry environment, where the air allows optimal isolation between the recording points. For this reason, a waterproof fibreglass helmet has been designed which, through a suitable valve system, provides a continuous flow of air to keep the recording space dry and not humid. In the same helmet, the Holter technique ***(Fig. 1, 2, 3)*** was used, which allows continuous recording of signals that can be studied later at the end of the underwater work. In addition, Bluetooth® technology (10) allows the quality of the signals to be checked before the dive, without the burden of wires.

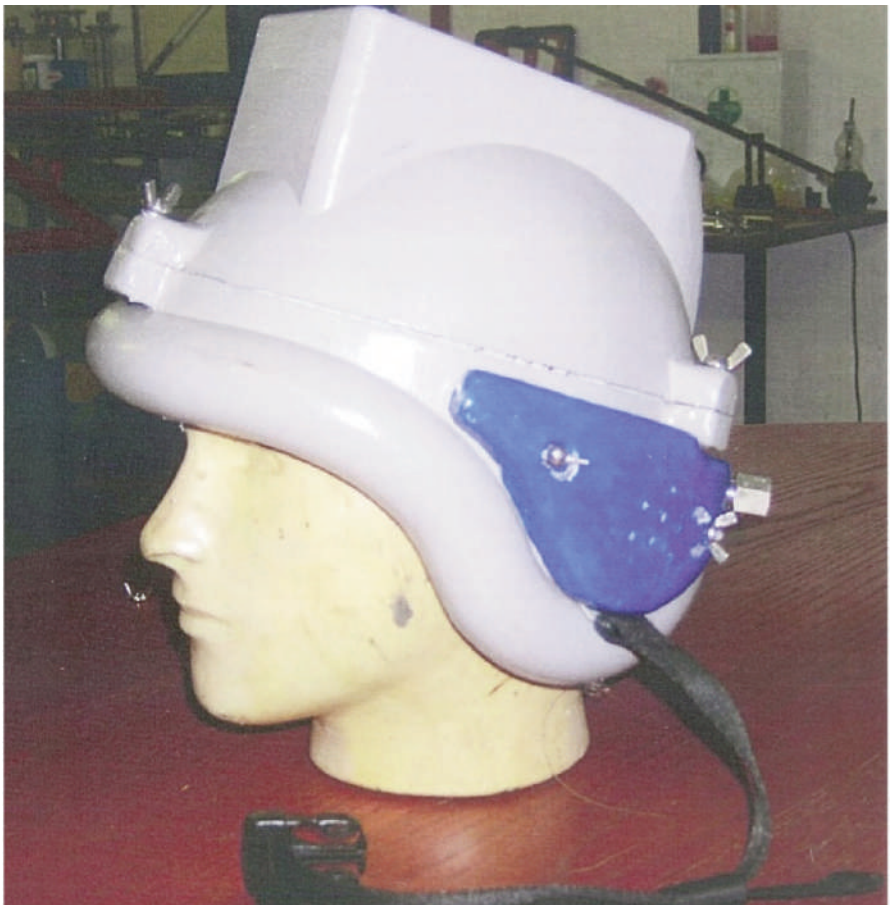


Fig. 1 - Closed helmet.

Fig. 2 - Open helmet.

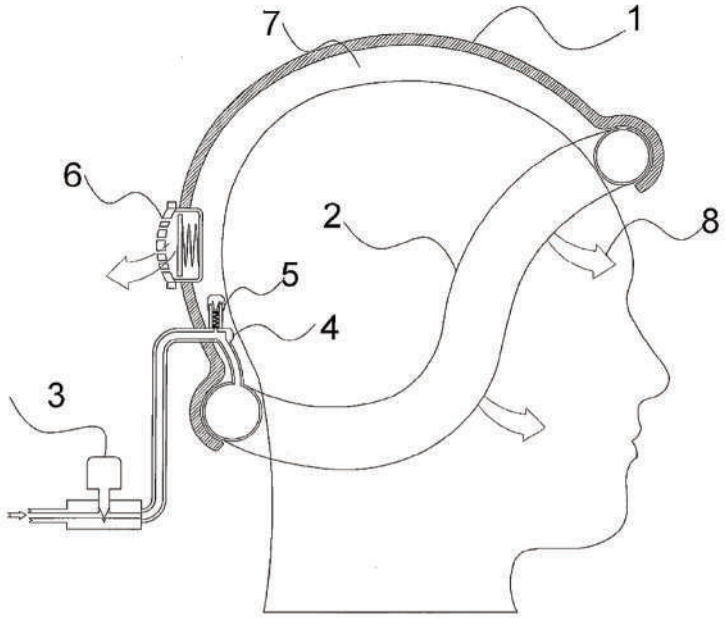


Fig. 3 - Helmet section with the different components:
1) External protection
2) Sheath of soft material to be adapted to the operator's head
3-4-5-6-7) Valve system

This has solved several problems: the helmet must be dismantled into two parts to allow fine-tuning of the electrodes before recording (correct positioning and detection of their resistance). In reality, correct positioning is achieved by placing the electrodes in the same position in a pre-wired headset ***(Fig. 4)***, which is then worn by the operator. This pre-wired arrangement also has the advantage that recordings from different operators are comparable because they are performed in the same way. The current helmet models use Holter equipment designed for use in a clinical environment and are therefore bulky; future models can overcome this disadvantage by using purpose-built equipment.

The helmet in question, which is vaguely resembling a motorcyclist's helmet, is designed to leave the face free, even when protected by goggles, so that a standard snorkel-type breathing apparatus can be used. It can thus be used by various categories of underwater operators, both military and civilian, who operate for different purposes but always use a regulator at face level.

The helmet, also called PASSOR, is worn by a dive operator and can perform EEG (electrical brain activity) and ECG (electrical heart activity) examinations with recordings while underwater at different depths.

It keeps the skull completely dry, preventing water ingress from the outside and water vapour build-up on the inside. It also automatically adapts internal pressure to external pressure, which varies according to the depth at which you descend, maintaining a slight overpressure inside by means of a continuous flow of dry air. The flow comes from the same cylinder that supplies the diver's regulator.

The current version is a prototype, handmade and recently improved with a new purpose-built pneumatic seal and new internal elements. A standardised product can be achieved when sufficient resources are available.

The lower, annular part houses the pneumatic seal in a groove, a curved support for attaching the recorder and various couplings, valves and switches for the various functions. The headset with pre-wired electrodes ***(Fig. 4, 5)*** is then fitted and positioned with the gasket just above the ears and then pushed down.

PASSOR is divided into two parts to facilitate electrode tuning.

Note the following:

- The connection to the recorder
- The correct position of the gasket around the head.

The gasket is kept under pressure by a continuous flow of air, always coming from the tank; the flow is dosed with a fine adjustment knob. Excess air is expelled inside the helmet through a calibrated nozzle, creating a slight overpressure that can be controlled by a calibrated valve located at the top of the helmet. Before hermetically sealing the top of the helmet with an O-ring, it is possible to check the correct functioning of all the electronic components by connecting them to the control unit.

Due to the size of the recorder (BE-micro EBNeuro Florence recorder) and its connections, the helmet has an internal volume which creates disturbing positive buoyancy when diving. In order to overcome this inconvenience, the PASSOR helmet is equipped with lead ballasts to be applied before entering the water.

The pressure of the pneumatic seal and the pressure inside the helmet must be maintained at a constant level by means of the continuous flow regulator.

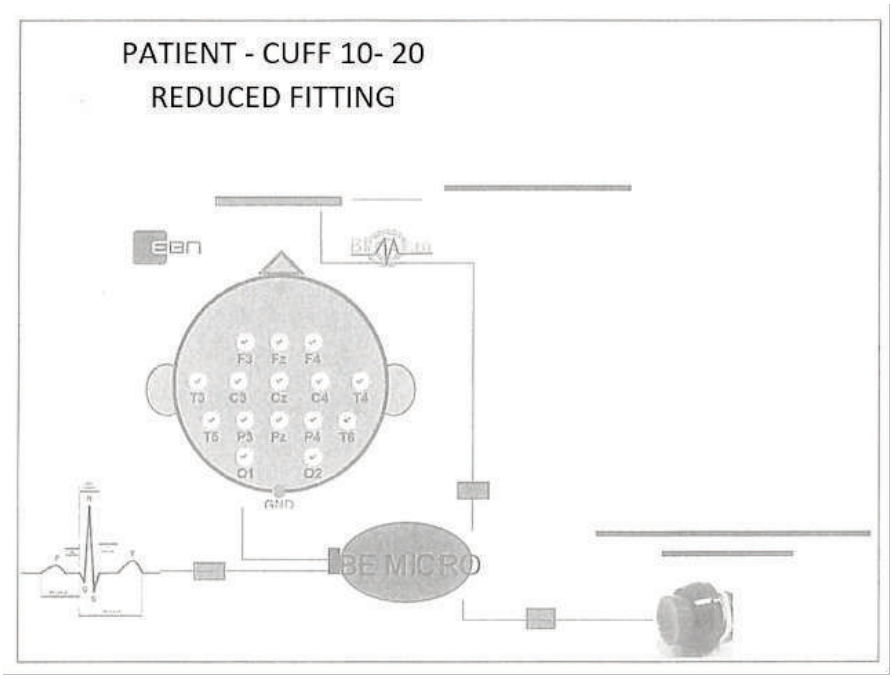


Fig. 4 - Reduced headphones.

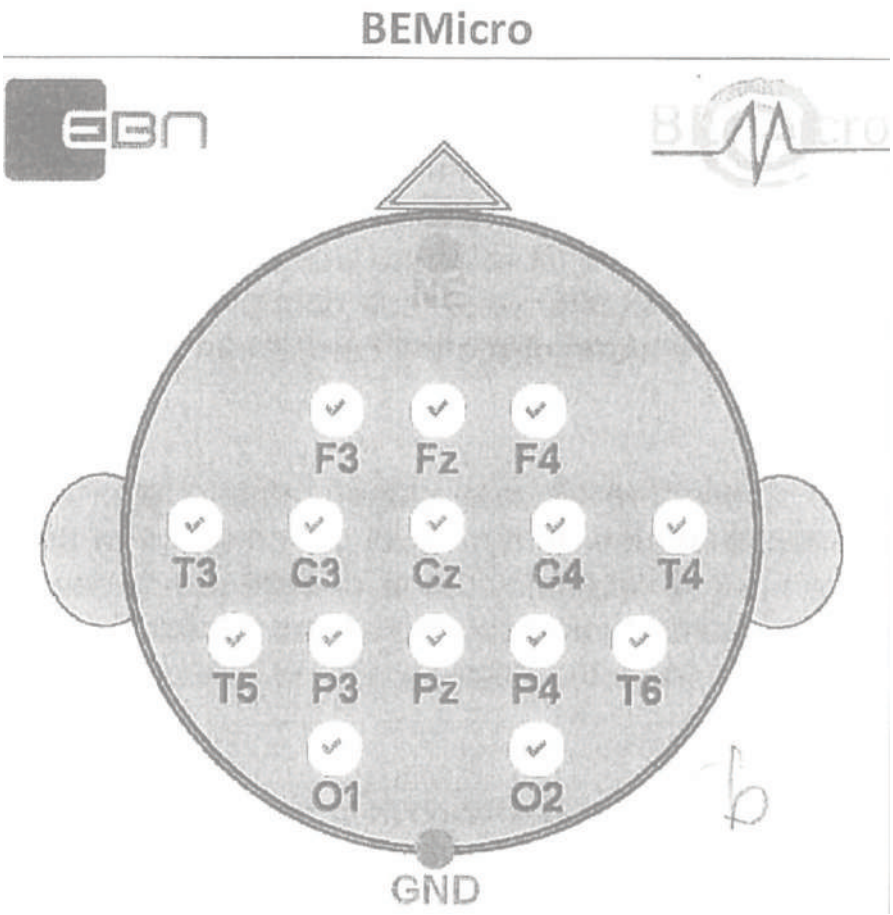


Fig. 5 - P300 Registration Scheme.

It is well known that as you descend, external pressure increases, even considerably, but since internal pressure is supplied by the first stage pressure controller (of the regulator), it adjusts and increases automatically, so that it is not necessary to continue to operate the knob. You will therefore always have a sufficiently inflated seal and overpressure inside the helmet that keeps the internal environment dry and prevents any small infiltrations from the outside.

When ascending from a dive depth to the surface or to a shallower depth, the valve system described above vents excess pressure to the outside without harm to the diver. The valve system is covered by patent number 202017000027263, dated 14/03/2017, entitled "Adjustable and co-ordinated valve system applicable to a helmet worn by a diving operator".

The helmet can also be equipped with a small LED screen ***(Fig. 6)***, activated by a button, to record a P300 (11) cognitive potential evoked by light stimuli in water.

The control board of the visual stimulator is equipped with several programmes and is housed in the BE Micro recorder holder. The headset used is the same as that used for standard EEG recordings.

To use the equipment correctly, the following steps must be followed:

1. put on the headset with the electrodes;
2. put on the lower part of the helmet with the seal deflated, making sure that the electrodes have not moved;
3. slightly inflate the pneumatic seal and ensure that it fits snugly around the head. The seal should not cover the ears, but should be pushed down as far as possible while remaining above the ears;

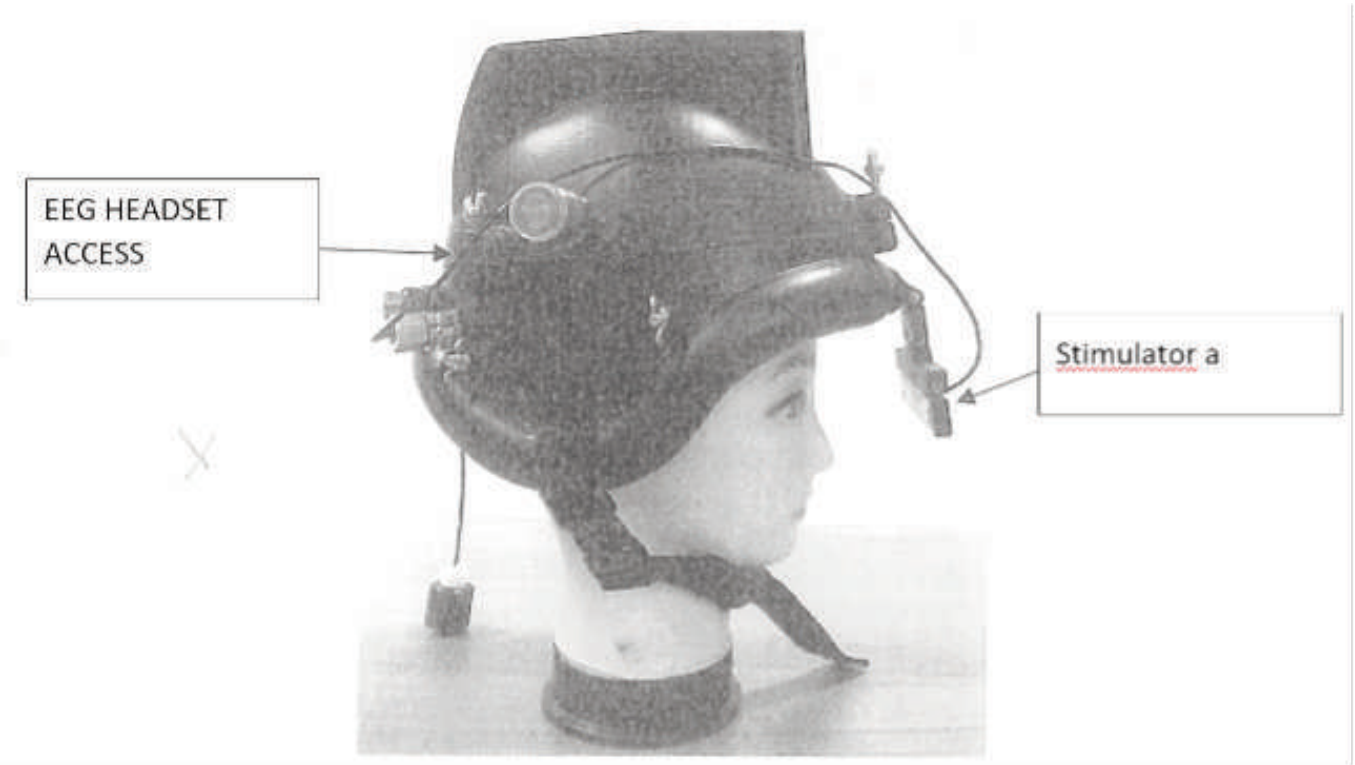


Fig. 6 - Helmet with P300 adjustment system.

4. connect the electrodes to the skin underneath by injecting gel with a syringe;
5. insert the recorder-holder bridge into the appropriate slots, place the recorder in its housing and connect it to the headphone wires by connecting it to the external computer to check that everything is working.

During these operations, the gasket must be kept inflated with a continuous flow so that it remains integral with the head. Excess air is expelled through the calibrated nozzle. The helmet can now be closed with the top cap and wing screws. Make sure that the excess air that will fill the inside of the helmet is vented through the pressure relief valve, which can be adjusted to keep the internal pressure slightly higher than the external pressure, but not too high.

Thanks to the patented system for coordinating the inflation and deflation valves, it is possible to descend to depth and then ascend again without any problems, as the internal pressure is automatically adjusted to the external pressure.
To perform good maintenance after diving, especially in salt water, it is necessary to rinse well with fresh water, dry and grease the O-rings and all internal and external metal parts with suitable grease to protect them from corrosion.

Future prospects for clinical practice

The PASSOR helmet is a technology capable of detecting biological parameters in environments at different depths and is therefore very useful for studying human adaptability.
The recorded bioelectrical signals (ECG and EEG) ***(Fig. 7),*** together with the P300 visual evoked potentials, can be combined with other biological parameters, such as O_2 saturation, skin temperature, spirogram and other blood values, in order to obtain a more complete picture of the psychophysical state of the operators and thus prevent possible diving accidents. In addition, the equipment can be used to monitor variations in various biological constants caused by different breathing mixtures at different depths. An important application can be the study of the variations of the different patterns after specific exercises in order to have a correlation between them and the psychophysical state of the operators. In addition, many pieces of diving equipment can be evaluated on the basis of the operator's biological responses and thus optimised from this point of view as well. Until now, the hyperbaric chamber (3, 4, 5) has only been useful to study the influence of pressure variations (simulating different depths),

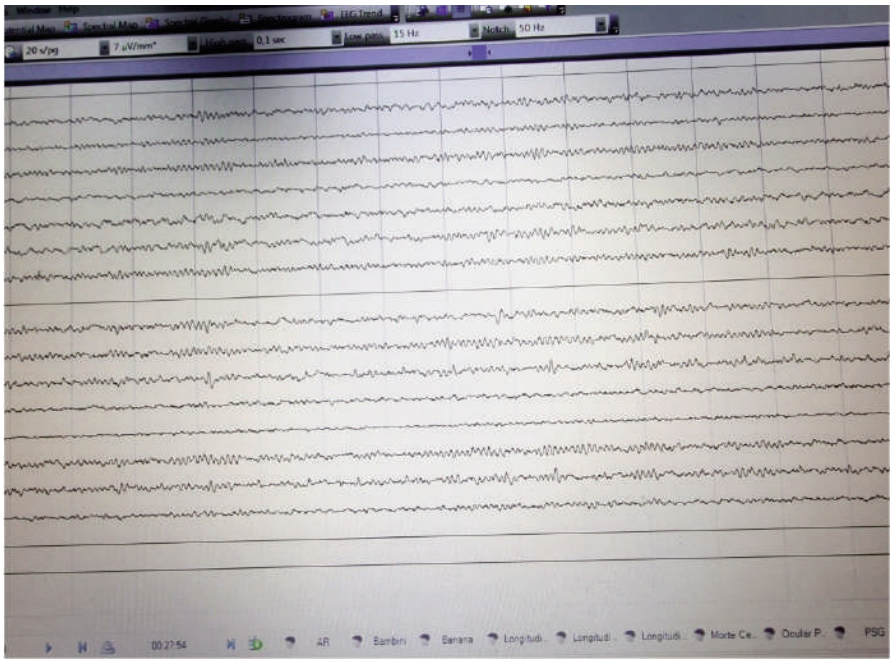


Fig. 7 - Esempio di registrazione EEG in acqua a quota - 3 metri.

whereas PASSOR provides a more comprehensive and complete picture.

In water, there are many variables: isolation of operators with communication difficulties, different temperature and pressure conditions, lighting variability, etc. All these parameters have a considerable influence on the psychophysical conditions of the operators and must therefore be carefully observed and studied. The only limitation of PASSOR that we have identified so far is that the recordings are not available in real time, but are recorded on a solid-state storage device and can only be analysed later (off-line). In the future, with the development of technology, this drawback can be overcome by connecting the helmet system to special detection stations in order to monitor the operators' conditions in real time and thus prevent possible dangerous situations.

With the appropriate simplifications, the helmet system can also be used in the aerial environment, both for monitoring hazardous working conditions (ship bilges, tank interiors, heavy vehicle cockpits, etc.) and for the same purposes described for the underwater environment. Obviously, in order to be immediately operational, the helmet system must be equipped with automatic systems for the statistical evaluation of the results, so that they can be displayed and thus make the system complete.

Disclosures:

The author declares no conflict of interest.

Article received on 04/07/2023; reviewed on 11/12/2023; accepted on 18/12/2023.