

Contenuto di vapore acqueo durante CPAP con elmetto: abbiamo bisogno di umidificare i gas ispirati?

■ ALBERTO LUCCHINI¹, STEFANO ELLI¹, MATTEO MANICI², GIUSEPPE FOTI³, ELISA MATTIUSI⁴, STEFANO BAMBI⁵

¹ Infermiere coordinatore, Dipartimento di emergenza e urgenza, Terapia intensiva generale, Azienda Ospedaliera San Gerardo, Monza, Università degli Studi di Milano-Bicocca

² Infermiere, Terapia Intensiva, Azienda Ospedaliera-Universitaria – Parma

³ Direttore Dipartimento di Emergenza, Azienda Ospedaliera A. Manzoni, Lecco

⁴ Infermiere, Terapia intensiva, Ospedale S. Maria della Misericordia, Udine

⁵ Dottorando di Ricerca in Scienze Infermieristiche, Terapia Intensiva di Emergenza DAI DEA, Azienda Ospedaliero Universitaria Careggi, Firenze

Riassunto

Introduzione: durante CPAP con Elmetto (E-CPAP), il paziente inspira del gas medicale in un sistema sottoposto a pressione positiva, senza contatto con l'ambiente esterno. In questa situazione potrebbero svilupparsi condizioni di umidità assoluta di vapore acqueo inferiore a quanto suggerito dalla letteratura.

Materiale e metodi: studio a metodi misti in tre fasi. Nella prima fase, svolta in vivo, sono stati arruolati 15 pazienti sottoposti a E-CPAP senza umidificazione. La temperatura media registrata all'interno del casco è stata pari a 27.2°C (SD±0.9 – range 26.2 -29.3). Quando il flusso è stato generato con un sistema Venturi, con frazioni inspiratorie dell'ossigeno maggiori di 0.6, all'interno dell'elmetto l'umidificazione assoluta (UA) è sempre stata inferiore a 10 mg H₂O/L (Umidità relativa (UR): <10%). Generando il flusso con gas medicali (aria compressa e ossigeno) l'UA all'interno dell'elmetto è stata 0.50 mg H₂O /L, con un UR pari al 2.70%. Sono stati testati in vitro i seguenti umidificatori per la ventilazione non invasiva: F&P 810 e F&P 850 System™ (Fisher & Paykel Healthcare Limited®), DAR HC 2000 TM (Covidien®), and Hudson Neptune™ (Teleflex medical®). Tutti gli umidificatori attivi termoriscaldati testati in in condizioni differenti, sono in grado di for-

Water vapor in CPAP ventilation helmets: should the gases inspired be humidified?

■ ALBERTO LUCCHINI¹, STEFANO ELLI¹, MATTEO MANICI², GIUSEPPE FOTI³, ELISA MATTIUSI⁴, STEFANO BAMBI⁵

¹ Nurse Manager, Emergency Dept. ICU, San Gerardo General Hospital, Monza, Milan-Bicocca University

² RN, ICU, Parma University-Hospital

³ Director of the Emergency Dept., A. Manzoni Gen. Hospital, Lecco

⁴ RN, ICU, S. Maria della Misericordia Hospital, Udine

⁵ PhD student in Nursing Sciences Research, Emergency Dpt. ICU, Careggi University Hospital, Florence

Abstract

Introduction: when CPAP is delivered through a helmet (H-CPAP), the patient inhales the medical gas under positive pressure without coming in contact with the external environment. In such cases, conditions of absolute water vapor humidity may develop at a lower rate than that recommended in literature.

Material and methods: a three-phase mixed method study. In the first "in vivo" phase, 15 patients undergoing H-CPAP without humidification were enrolled.

Results: the average temperature inside the helmet was of 27.2°C (SD±0.9–range 26.2-29.3). In the second phase carried out "in vitro," the average temperature, Absolute Humidity (AH) and Relative Humidity (RH) were registered inside the helmet during CPAP with gas flow of 60 l/min. When the flow was generated through a Venturi system with the oxygen inspiratory fraction greater than 0.6, the AH inside the helmet was always lower than 10 mg H₂O/L and RH <10%). On generating the flow with medical gases the AH inside the helmet was 0.5 mg H₂O/L, with an RH of 2.7%. Finally the following humidifiers, usable for non invasive ventilation, were tested in vitro: F&P 810 and F&P 850 System™ (Fisher & Paykel Healthcare Limited®), DAR HC 2000 TM (© Covidien®), and Hudson Neptune™ (Teleflex medical). All the heated active humidifiers under the differ-

nire almeno 10 mg mgH₂O/L, indipendentemente dal flusso erogato.

Conclusioni: nel paziente sottoposto a E-CPAP ad alto flusso, se non vengono utilizzati degli umidificatori attivi, esiste un problema di sotto-umidificazione delle vie aeree.

Parole chiave: Elmetto-CPAP, umidificatori riscaldatori, umidità assoluta, umidità relativa, umidificazione.

Articolo originale

PERVENUTO IL 19/02/2015

ACCETTATO IL 20/03/2015

Gli autori dichiarano di non aver conflitto d'interesse.

Corrispondenza per richieste:

Alberto Lucchini, a.lucchini@hsgerardo.org

Introduzione

L'applicazione della Ventilazione non Invasiva (NIV) è largamente diffusa nei reparti intensivi e semintensivi italiani come evidenziato da una recente *survey* internazionale.¹ A differenza degli altri paesi della comunità europea, in Italia l'elmetto è la principale interfaccia utilizzata per l'applicazione della CPAP nei pazienti con insufficienza respiratoria acuta.^{2,3}

Un'altra differenza riguarda le modalità per erogare il flusso di gas (gas-flow) per alimentare l'elmetto. In Italia vengono principalmente utilizzati i sistemi Venturi o le scatole rotametriche aria-ossigeno.¹

L'applicazione della CPAP ad alto flusso può migliorare l'ossigenazione nei pazienti con insufficienza respiratoria acuta.^{4,5} I benefici del trattamento sono maggiori quando il tempo di trattamento è prolungato fino ad arrivare ad una applicazione in continuo.^{6,7} Per ottenere una tollerabilità al trattamento, l'infermiere può mettere in atto alcuni interventi che riguardano il tipo di fissaggio dell'elmetto, il rumore e l'umidificazione dei gas inspirati.⁸

Sulle problematiche legate al rumore ed ai sistemi di fissaggio alcuni autori hanno trovato soluzioni facilmente riproducibili (utilizzo di contrappesi, elmetti con collare rigido, utilizzo di filtri per ridurre il rumore).⁸

Sull'umidificazione ed il condizionamento dei gas inspirati invece, esistono in letteratura studi con dati contrastanti. Alcuni autori suggeriscono di utilizzare solo un'umidificazione senza riscaldamento⁹, altri sconsigliano l'utilizzo degli umidificatori attivi perché determinano la formazione di condensa¹⁰ ed altri ancora sostengono che non sia sempre necessario umidificare i gas inspirati durante la E-CPAP.^{11,12}

L'E-CPAP è spesso applicata senza sistemi di umidificazione partendo dalla considerazione che le vie aeree superiori possano condizionare attivamente i gas inspirati.

Nei pazienti sottoposti a NIV per periodi prolungati senza umidificazione, sono però riportati casi di disepitelizzazione, riduzione del comfort e lesioni alla mucosa tracheale.^{13,14} Questi aspetti determinano poi una riduzione della tollerabilità con conseguente diminuzione dei tempi di applicazione.^{3,14}

Alcuni panel di esperti raccomandano, altresì, che nei gas erogati durante NIV deve essere presente un'umidità assoluta (UA) di almeno 10 mg di vapore acqueo per ogni litro ventilato (mg H₂O/L).^{15,16}

ent testing conditions were able to supply 10 mgH₂O/L, irrespective of the given flow.

Conclusions: in patients subjected to high flow H-CPAP, active humidifiers are necessary to avoid the under-humidification of the airways.

Key words: Helmet-CPAP, heated humidifiers, absolute humidity, relative humidity, humidification.

Original article

SUBMITTED ON 19/02/2015

ACCEPTED ON 20/03/2015

The authors declare to have no conflicts of interest.

Contact person: Alberto Lucchini, a.lucchini@hsgerardo.org

Introduction

The application of Non-Invasive Ventilation (NIV) is widespread in the Italian intensive and semi-intensive care units as evidenced by a recent international *survey*.¹ Unlike the other countries of the European Community, in Italy the helmet interface is the main system used to deliver CPAP in patients with acute respiratory failure.^{2,3}

Another difference lies in the methods used to supply the gas flow to the helmet. The main systems used in Italy are the Venturi or the rotating air-oxygen control attachments.¹

The application of high-flow CPAP may improve oxygenation in patients with acute respiratory failure.^{4,5} The benefits of the treatment are greater when the treatment time is prolonged until continuous application is reached.^{6,7} To obtain a tolerability to the treatment, the nurse may undertake some interventions that regard the type of helmet seal, noise levels, and humidification of the gases inspired.⁸

As to the problems related to noise levels and the fixing system, some authors discovered some easily applicable solutions (use of counterweights, helmets with stiff collars, noise-reducing filters).⁸

However, with regard to humidification and conditioning of the gases inspired, some studies found in literature gave contrasting data. Some authors suggested to use only unheated humidifiers,⁹ others discouraged the use of active humidifiers since they cause condensation to form,¹⁰ while others sustained that it is not always necessary to humidify the gases inspired during H-CPAP.^{11,12}

The frequent application of H-CPAP without humidifying systems is based on the consideration that the upper airways can actively condition the gases inspired.

However, it was noted that some patients subjected to NIV for long periods, evidenced cases of de-epithelialization, reduced comfort, and lesions in the tracheal mucous.^{13,14} These aspects then determined a reduced tolerance with the consequent reduction of application times.^{3,14}

Some panels of experts furthermore suggested that the gases delivered during NIV should contain an absolute humidity (AH) of at least 10 mg of water vapour for every liter ventilated (mg H₂O/l).^{15,16} Absolute Humidity is the amount of water vapor contained in a liter

L'UA è la quantità di vapore acqueo contenuta in un litro d'aria. L'umidità assoluta di saturazione è la quantità massima di vapore acqueo che l'aria può contenere ad una data temperatura. L'umidità relativa (UR) esprime la quota di vapore acqueo contenuto realmente in un litro d'aria, ad una determinata temperatura, rispetto alla capacità massima di saturazione e viene espressa in percentuale.

La temperatura, l'UA e la UR all'interno dell'elmetto sono influenzati da diversi fattori quali il flusso di gas (> 30 lt/min), la temperatura della stanza ed il sistema di erogazione dei gas medicali.¹⁷

Come suggerito da numerosi autori, l'E-CPAP andrebbe erogata a flusso continuo, senza utilizzare i ventilatori polmonari. Per questo motivo, il flusso deve entrare nell'elmetto da un ingresso posto su di un lato ed uscire dal lato opposto. Il gas-flow erogato dovrebbe sempre essere superiore a 30 lt/min per ottenere un'efficace rimozione della CO₂ espirata dal paziente.^{17,18} Inoltre un flusso elevato contribuisce a mantenere costante la pressurizzazione all'interno dell'elmetto al livello di PEEP preimpostato, durante tutto il ciclo respiratorio.

I gas possono essere erogati mediante sistemi Venturi o mediante scatole rotametriche che utilizzano i gas medicali. Nel primo caso il sistema preleverà, in base alla concentrazione di ossigeno impostata (FiO₂), parte dell'aria ambiente per l'erogazione del flusso. In questo modo verrà portata all'interno dell'elmetto parte dell'umidità presente nell'aria ambiente.¹⁹

Quando invece vengono utilizzati esclusivamente i gas medicali, l'umidità e la temperatura presenti all'interno del casco saranno strettamente influenzati dalla UA presente nell'ossigeno e nell'aria compressa erogata.

L'utilizzo di due ingressi separati rende impossibile l'utilizzo degli *Heat Moisture Exchange* (HME) per umidificare gli elmetti durante High-Flow E-CPAP. Inoltre l'utilizzo degli HME durante NIV viene sconsigliato dalle recenti linee guida.²⁰

L'obiettivo primario di questo studio è identificare quale sia la temperatura presente all'interno di un elmetto in cui viene erogata la CPAP a flusso continuo e verificare se vi sia differenza con la temperatura registrata all'interno di una maschera facciale in cui viene erogata la pressione di supporto.

L'obiettivo è legato alla possibilità di utilizzare per l'umidificazione dei pazienti sottoposti a E-CPAP, gli attuali sistemi attivi con circuiti termoregolati la cui impostazione è però studiata per la NIV erogata con maschera. Abbiamo ipotizzato che le temperature misurate nei due dispositivi, possano essere simili, rendendo applicabile anche ai pazienti con E-CPAP le impostazioni studiate per NIV con maschera. Il secondo obiettivo è la rilevazione di UR e UA all'interno del casco durante la CPAP ad alto flusso, in vitro, con diversi sistemi di erogazione del flusso (gas medicali *versus* sistemi Venturi) per verificare quali siano le condizioni dei gas inspirati dal paziente durante E-CPAP.

L'ultimo obiettivo di questa ricerca è stato quello di valutare le prestazioni di 4 tipi di umidificatori termoregolati presenti in commercio, durante E-CPAP in vitro, con l'utilizzo delle impostazioni NIV.

of air. The AH of saturation is the maximum amount of water vapor the air can contain at a given temperature. Relative Humidity (RH) expresses the rate of water vapor contained in a liter of air at a given temperature with respect to the maximum capacity of saturation and is expressed in percentage.

The temperature, AH and RH inside the helmet are affected by various factors such as the gas flow (> 30 l/min), room temperature and the medical gas delivery systems.¹⁷

As many authors suggested, H-CPAP should be delivered in a continuous flow, without using lung ventilators. Because of this, the flow should enter the helmet from an inlet port placed on one side and exit at the port on the opposite side. The gas flow delivered should always be greater than 30 l/min to obtain an effective removal of the CO₂ expired by the patient.^{17,18} Moreover, a high flow would contribute to maintaining a constant pressure inside the helmet at the preset PEEP level, during the entire respiratory cycle.

The gases can be delivered with Venturi systems or through rotating attachments that use medical gases. In the first case, according to the oxygen concentration (FiO₂) set, the system will take part of the air in the room to deliver the flow. In this way, part of the humidity present in the room will be conducted into the helmet.¹⁹

Instead, when medical gases are exclusively used, the humidity and temperature inside the helmet will be strictly affected by the AH present in the oxygen and in the compressed air delivered.

The use of two separate inlets makes it impossible to use Heat Moisture Exchange (HME) systems to humidify the helmets during high-flow H-CPAP. Furthermore, recent guidelines do not recommend the use of the HME during NIV.²⁰

The primary objective of this survey is to identify the ideal temperature to be maintained inside a helmet delivering continuous-flow CPAP as compared with the temperature registered inside a facial mask for pressure support ventilation.

The objective is linked to the possibility of achieving humidification of patients subjected to H-CPAP through current active humidification systems with heat-regulated circuits, the settings of which, however, have been studied for NIV delivered through a mask. We presumed that the temperatures registered in the two devices can be similar, so as to make the settings studied for mask-delivered NIV also applicable to patients subjected to H-CPAP.

The second objective was to carry out *in vitro* measurements of the RH and AH inside the helmet during high-flow CPAP, with different flow delivery systems (medical gases vs. Venturi systems) so as to verify the conditions of the gases inspired by patients during H-CPAP.

The last objective of this study was to make an *in vitro* assessment, during H-CPAP, of the performances of four types of heated humidifiers available on the market, using the NIV settings.

Materials and methods

A mixed-method study conducted in three phases. The first phase was carried out "in vivo" on two groups of patients subjected to NIV. In the first group, the mean temperature in a helmet was taken during

Materiali e metodi

Studio a metodi misti condotto in tre fasi. La prima fase è stata svolta in vivo in due gruppi di pazienti sottoposti a ventilazione non invasiva. Nel primo gruppo è stata rilevata la temperatura media all'interno di un elmetto durante CPAP (Castar CPAP™ STARMED© Intersurgical Ltd U.K.) ad alto flusso (60 l/min – aria ed ossigeno medicali) senza sistema di umidificazione. La PEEP era compresa tra 5 e 10 cmH₂O. Per generare il flusso di gas medicale è stata utilizzata una scatola rotametrica modello SF1 (Flow-meter S.p.A. – Italia). Per generare la PEEP è stata applicata una valvola ad acqua modello 801511 (Harol S.p.A. – Italia).

Nel secondo gruppo è stata registrata la temperatura all'interno di una maschera *full-face* (Performax Philips Respironics© Koninklijke Philips N.V – taglia L) in cui veniva erogata una pressione di supporto (Ventilatori a gas compressi).

La temperatura è stata registrata mediante temperature probe della ditta Dräger Medical© (Drägerwerk AG & Co. KGaA). Il dato è stato rilevato dopo 30 minuti dal posizionamento della sonda.

La seconda fase è stata svolta in vitro per la rilevazione della temperatura, dell'UA e dell'UR presenti in un sistema CPAP con elmetto in cui il flusso è stato erogato in primo luogo attraverso un sistema alimentato da gas medicali e secondariamente mediante un sistema di tipo Venturi (Venturimetro STARVENT™ STARMED© Intersurgical Ltd U.K.). Il flusso continuo di gas è stato erogato a 30, 60 e 90 l/min.

Per la rilevazione di temperatura, UA e UR è stato utilizzato un igrometro mR1000 (Yokogawa, Tokio – Giappone) con due sonde (bulbo secco e bulbo umido), posizionate all'interno dell'elmetto. **(Figura 1)**

La terza fase, svolta sempre in vitro, ha rilevato Temperatura, UA e UR all'interno di un elmetto durante E-CPAP con diverse condizioni di flusso (30, 60 e 90 l/min) abbinato ai seguenti umidificatori attivi termoriscaldati: F&P 810 System™, F&P 850 System™ (Fisher & Paykel Healthcare Limited©), DAR HC 2000™ (Covidien©) e Hudson Neptune™ (Teleflex medical©).

La temperatura media è stata registrata in tre diverse misurazioni per ciascuno degli scenari investigati.

Gli umidificatori al momento della connessione erano funzionanti da almeno 60 minuti. **(Figura 2)**

Lo studio è stato svolto presso il Dipartimento di Emergenza e Urgenza – Terapia intensiva Generale dell'Azienda Ospedaliera Universitaria San Gerardo di Monza. Il protocollo è stato sottoposto ad approvazione con esito positivo da parte del locale Comitato Etico.

Analisi statistica

I risultati sono espressi come media ± deviazione standard. Per le differenze tra due gruppi sono stati effettuati test non parametrici (Mann-Withney). Un valore di $p < 0.05$ è stato considerato significativo.

Risultati

Sono stati arruolati 30 pazienti, 15 sottoposti a E-CPAP a flusso continuo e 15 sottoposti a PSV erogato con maschera facciale. L'età media dei pazienti sottoposti a E-CPAP (flusso gas 60l/min – PEEP = MD 10.2±2.1 cm H₂O) è stata di 53.14 (SD±8.92) anni. La tem-

high flow (60 l/min – medical air and oxygen) CPAP delivery (Castar CPAP™ STARMED© Intersurgical Ltd U.K.) without a humidifying system. The PEEP ranged between 5 and 10 cmH₂O. To generate the flow of medical gas, a rotameter SFI model (Flow-meter S.p.A. – Italy) was used. To generate the PEEP a water valve 801511 (Harol S.p.A. – Italy) was applied.

In the second group, the temperature in a *full-face* mask (Performax Philips Respironics© Koninklijke Philips N.V – size L) was recorded, through which pressure support (compressed gas ventilators) was delivered.

The temperature was recorded through a temperature probe of the Dräger Medical© (Drägerwerk AG & Co. KGaA). The data was taken 30 minutes after the probe was positioned.

The second phase was carried out *in vitro* for temperature measurement of the AH and RH present in an H-CPAP system, where the flow was issued firstly through a medical gas feed system and secondly through a Venturi system (Venturimetro STARVENT™ STARMED© Intersurgical Ltd U.K.). The continuous gas flow was issued at 30, 60 and 90 l/min.

Measurement of the temperature, AH and RH was done through a hygrometer mR1000 (Yokogawa, Tokyo – Japan) with two probes (wet and dry bulb thermometers) placed inside the helmet. **(Figure 1)**

The third phase, was also an *in vitro* measurement of the temperature, AH and RH inside a helmet during H-CPAP under different flow conditions (30, 60 and 90 l/min) matched with the following active heated humidifiers: F&P 810 System™, F&P 850 System™ (Fisher & Paykel Healthcare Limited©), DAR HC 2000™ (Covidien©) and Hudson Neptune™ (Teleflex medical©).

The mean temperature was taken in three different recordings for each of the scenarios under study.

The humidifiers had been running for at least 60 minutes at the time of connection. **(Figure 2)**

The study was carried out at the Emergency Department – General ICU of the University Hospital of Monza. The protocol was subjected to approval with a positive outcome on the part of the local Ethics Committee.

Statistical analysis

The results are expressed as a mean ± deviation standard. For the differences between the two groups, non-parametric tests (Mann-Withney) were performed. A value of $p < 0.05$ was considered as meaningful.

Results

Out of the thirty patients enrolled, 15 were subjected to continuous flow H-CPAP and 15 subjected to pressure support ventilation (PSV) with a face mask. The mean age of the patients subjected to H-CPAP (gas flow 60 l/min – PEEP = MD 10.2±2.1 cm H₂O) was 53.14 years (SD±8.92). The mean temperature inside the helmet was equivalent to 27.2°C (SD±0.9 – range 26.2 – 29.3) with a mean room temperature of 23.9°C (SD±0.43 – range 23.0 –

peratura media registrata all'interno del casco è stata pari a 27.2°C (SD±0.9 – range 26.2 – 29.3) con una temperatura media dell'ambiente di 23.9°C (SD±0.43 – range 23.0 – 24.5) ed una temperatura vescicale media di 36.9°C (SD±0.5 – range 36.0 – 37.9).

L'età media dei pazienti sottoposti a PSV in maschera (Mask-PSV) è stata di 43.4 (SD±28.3) anni. La temperatura media registrata all'interno della maschera è stata pari a 27.9°C (SD±1.6 – range 26.2 – 30.6) con una temperatura media dell'ambiente di 23.7°C (SD±0.6 – range 22.7 – 24.2) ed una temperatura vescicale media di 36.5°C (SD±0.6 – range 35.2 – 37.0), con un PSV medio erogato pari a 12.2±2.1 cm H₂O. I due gruppi sono risultati omogenei rispetto all'età media (p=0.234), alla temperatura registrata all'interno dell'interfaccia (p=0.285), alla temperatura ambiente (p=0.15) ed alla temperatura vescicale (p=0.784).

La prima situazione da banco testata ha riguardato la rilevazione della temperatura, dell'UA e dell'UR all'interno di un elmetto in cui veniva erogato un flusso continuo di 30, 60, e 90 L/min, generato con un sistema Venturi. Per ogni singola impostazione dei flussi la concentrazione di ossigeno inspirato è stata erogata al 40%, 60% e 80%. La stanza in cui si è svolto il test aveva una temperatura di 23.2°C, con una umidità ambientale di 12.1 mg H₂O/l ed una umidità relativa del 50%.

In tutte e tre le situazioni investigate, pur utilizzando una miscela di ossigeno medicale ed aria ambiente, si è registrato un livello di umidità assoluta lontano dai 10 mg per litro ventilato raccomandati dalla letteratura.^{15,16} **(Tabella 1)**

La seconda situazione analizzata ha registrato i valori di temperatura, di UA e UR all'interno di un elmetto in cui il flusso applicato per generare la CPAP era ottenuto esclusivamente con gas medicali. La stanza in cui si è svolto il test aveva le medesime condizioni ambientali dello step precedente. Con un flusso di gas pari a 30, 60 e 90 l/min la temperatura registrata è stata di 23.0 °C con una UA di 0,50 mg/l e con una UR pari al 2.70%.

La terza condizione investigata ha riguardato l'impiego degli umidificatori attivi. Nel primo test è stato utilizzato un umidificatore sistema disegnato per l'utilizzo domiciliare (Fisher and Paykel 810™) abbinato ad un sistema di erogazione gas di tipo Venturi. Per il test è stato utilizzato il settaggio della temperatura della camera di umidificazione su posizione "Low". In questa modalità, il dispositivo cerca di mantenere una temperatura all'uscita della camera di umidificazione di circa 28-29°. Tra quelle proposte dal sistema questa era quella più vicina alle temperature registrate nei due gruppi di pazienti studiati "in vivo". In questa configurazione, dove viene abbinato un umidificatore con circuito termoriscaldato ed un sistema di erogazione gas di tipo Venturi (sistema ideale per l'utilizzo della CPAP con scafandro al di fuori delle aree intensive), l'umidità assoluta si è sempre mantenuta al di sopra dei 10 mg H₂O/L. La temperatura media registrata è stata pari a 28.7°C (±0.6), l'umidità assoluta 13.9°C (±3.3) mg H₂O/L e l'umidità relativa 49.8°C (±10.5). Non si è registrata la formazione di condensa all'interno dell'elmetto in nessuna delle condizioni testate. **(Tabella 2)**

L'ultima parte del test ha riguardato l'utilizzo di sistemi di umidificazione attiva termoriscaldati dotati di software NIV posizionati su

24.5) and a mean urinary bladder temperature of 36.9°C (SD±0.5 – range 36.0 – 37.9).

The mean age of patients subjected to Mask-PSV was 43.4 (SD±28.3) years. The mean temperature recorded inside the mask was equivalent to 27.9°C (SD±1.6 – range 26.2 – 30.6) with a mean room temperature of 23.7°C (SD±0.6 – range 22.7 – 24.2) and mean urinary bladder temperature of 36.5°C (SD±0.6 – range 35.2 – 37.0), and a mean PSV issued at 12.2±2.1 cm H₂O. The two groups showed similar values with respect to the mean age (p=0.234), temperature registered in the interface (p=0.285), room temperature (p=0.15) and urinary bladder temperature (p=0.784).

The first test scenario regarded the measurement of the temperature, AH and RH inside a helmet providing a continuous flow of 30.60, and 90 l/min, generated with the Venturi system. For each single setting of the flows, the oxygen concentration inspired was delivered at 40%, 60% and 80%. The temperature of the room where the test was performed was 23.2°C, with room humidity of 12.1 mg H₂O/l and relative humidity of 50%.

In all the three situations studied, though using a mix of medical oxygen and room air, the AH level registered was far below the 10 mg/ventilation liter recommended in literature.^{15,16} **(Table 1)**

The second situation recorded the temperature, AH and RH values inside a helmet in which the flow applied to generate the CPAP was achieved exclusively with medical gases. The test room had the same environmental features of the previous step. With a gas flow of 30.60 and 90 l/min., the temperature registered was 23.0°C with an AH of 0.50 mg/l and RH equivalent to 2.70%.

The third condition studied concerned the use of active humidifiers. In the first test, the humidification system used was designed for home usage (Fisher and Paykel 810™) matched to a Venturi type of gas delivery. The test made use of settings in which the temperature of the humidification chamber was turned on "Low." In this procedure, the device tries to maintain a temperature of about 28-29° at the outlet port of the humidifying chamber. Among those proposed by the system, this was the device that came closest to the temperatures registered in the two groups of patients studied "in vivo." In this configuration, where the humidifier is combined with a heat regulated circuit and a Venturi type of gas supplementation (ideal for delivery of CPAP with the attachment piping outside the IC areas), the AH is always maintained above 10 mg H₂O/l. The mean temperature registered was equivalent to 28.7°C (±0.6), with an AH of 13.9°C (±3.3) mg H₂O/l and RH at 49.8°C (±10.5). No condensation formed inside the helmet in any of the conditions tested. **(Table 2)**

The last part of the test regarded the use of active heated humidifiers equipped with NIV software applied to an H-CPAP system. In this simulation the system was fed with medical gases (air and oxygen).

The temperature of the humidification chamber was set at the lowest value achievable, using as baseline reference the mean temperature registered in the *in vivo* phase of the study, in both the

un sistema per E-CPAP. In questa simulazione il sistema è stato alimentato con gas medicali (aria e ossigeno).

La temperatura della camera di umidificazione è stata posta al valore più basso ottenibile, utilizzando come punto di riferimento la temperatura media registrata nella fase in vivo dello studio, sia nel gruppo E-CPAP ($27.2 \pm 0.9^\circ\text{C}$), sia nel gruppo Mask-PSV ($27.9^\circ\text{C} \pm 1.6$). I 4 sistemi sono stati sottoposti ad un flusso di gas di 30, 60 e 90 lt/min.

La temperatura media registrata è stata di $28.4^\circ\text{C} (\pm 0.2)$, l'UA $13.9 \text{ mg/l} (\pm 3.71)$ e l'UR $51.5\% (\pm 13.4\%)$. Gli umidificatori testati sono mediamente in grado di fornire almeno $10 \text{ mgH}_2\text{O/L}$ ventilato indipendentemente dal flusso erogato. Si registra una progressiva riduzione della capacità di umidificazione dei sistemi investigati aumentando il gas-flow. In tutte le situazioni testate non si è registrata la formazione di condensa all'interno dell'elmetto. La **tabella 3** riassume i set-up utilizzati ed i risultati registrati con le quattro apparecchiature testate.

Discussione

Quando viene applicata una E-CPAP con gas medicali ad alto flusso, il paziente riceve dei gas con una UA molto lontana dai $10 \text{ mg H}_2\text{O/L}$ raccomandati dalla letteratura.^{15,16} Il problema è presente anche quando il flusso di gas viene generato con dei sistemi Venturi. Con questa configurazione, assieme ad una UA della stanza pari a $12 \text{ mg H}_2\text{O/L}$ (umidità relativa: 50% circa), la quota di umidità veicolata dall'ambiente esterno non permette comunque di raggiungere i $10 \text{ mg H}_2\text{O/L}$ all'interno dell'elmetto.

Nello studio di Chiumello e coll.¹⁰ si è sottolineata la possibilità di utilizzare gli umidificatori con set-up da ventilazione invasiva quando viene applicata una E-CPAP ad alto flusso. L'unica controindicazione registrata è la formazione di condensa. Questa situazione però, se da un lato risolve la problematica della quantità di umidità respirata dal paziente, sottopone quest'ultimo ad una condizione pari a quella che si avrebbe respirando in aria ambiente in una giornata con 37° di temperatura ed una UR maggiore del 80%. Questa situazione ridurrebbe il comfort del paziente e quindi la sua tolleranza al trattamento.⁹

La formazione di condensa all'interno dell'elmetto si può verificare quando il gas viene condizionato dall'umidificatore ad una temperatura maggiore di quella registrata all'interno dell'elmetto. Dai risultati del nostro studio emerge che la temperatura media presente all'interno delle interfacce NIV, quando non si utilizzano degli umidificatori attivi, è compresa tra 28 e 29° . Per evitare la formazione di condensa si dovrà impostare la temperatura della camera di umidificazione ad un valore inferiore ai 28° . Se si considera poi che i sistemi termoriscaldati funzionano in condizioni ottimali quando la temperatura dei gas aumenta tra camera di umidificazione e Y-paziente generalmente con un gradiente crescente di 2° , si può ipotizzare che la temperatura ideale per la camera di umidificazione sia da ricercare intorno ai 24 - 26° .

Gli umidificatori da terapia intensiva testati, pur avendo diverse possibilità di settaggio del limite di temperatura inferiore con modalità NIV inserita (DAR HC 2000™: 26° , F&P 850™: 31° e Neptune™: 28°), hanno difficoltà a condizionare al 100% di UR²¹ il gas-flow che attraversa la camera. Il condizionamento del gas raggiunge, anche a gas-flow elevati, almeno i 10 mg/l raccomandati dalla letteratura.^{4,22}

H-CPAP group ($27.2 \pm 0.9^\circ\text{C}$), and in the Mask PSV ($27.9^\circ\text{C} \pm 1.6$) group. The four systems were subjected to a gas flow of 30, 60 and 90 l/min. The mean temperature registered was $28.4^\circ\text{C} (\pm 0.2)$, l'UA $13.9 \text{ mg/l} (\pm 3.71)$ with an RH of $51.5\% (\pm 13.4\%)$. The humidifiers tested were on the average able to furnish ventilation of at least $10 \text{ mgH}_2\text{O/L}$ regardless of the flow delivered. There was a progressive reduction of the humidifying capacity of the systems studied, on increasing the gas flow. In all the settings tested there was no evidence of condensation inside the helmet. (**Table 3**) Summarizes, the set-ups used and the results registered with the four devices tested.

Discussion

On applying an H-CPAP with high flow medical gases, the patient receives the gas with an AH far below the $10 \text{ mg H}_2\text{O/L}$ recommended in literature.^{15,16} The problem exists also when the gas flow is generated with the Venturi systems. With this configuration, along with an AH of the room of $12 \text{ mg H}_2\text{O/L}$ (RH of about 50%), the rate of humidity channeled from the external environment, however, does not allow to reach $10 \text{ mg H}_2\text{O/L}$ inside the helmet.

The study of Chiumello et al.¹⁰ underlined the possibility of using humidifiers with invasive ventilation set-ups upon applying a high-flow H-CPAP. The only contraindication registered was the formation of condensation. If this situation, on one hand, resolved the problem of the quantity of humidity inspired by the patient, on the other hand it subjected him/her to a condition in which the room air breathed is equivalent to that inspired on a day with a temperature of 37° and an RH greater than 80%. This situation would reduce the patient's comfort and consequently his/her tolerance to the treatment.⁹

Condensation may form inside the helmet when the gas is conditioned by the humidifier at a higher temperature than that registered inside the helmet. The results of our survey reveal that when active humidifiers are not used the mean temperature inside the NIV interfaces ranges between 28° and 29°C . To prevent the formation of condensation, the temperature of the humidifying chamber will have to be set at a value below 28°C . If we were to then consider that the heated systems work in optimal conditions when the temperature of the gases increases between the humidification chamber and patient -Y generally with an increasing gradient of 2° , we may assume that the ideal temperature for the humidification chamber ranges between 24° - 26°C .

Even if the IC humidifiers tested can variably be set at lower temperature limits with the NIV insertion mode (DAR HC 2000™: 26° , F&P 850™: 31° and Neptune™: 28°), they encounter difficulties in conditioning at 100% of RH the gas passing through the chamber. But at least the conditioning of the gas reaches, even at high gas-flows, the 10 mg/l recommended in literature.^{4,22}

Lastly, this technical limit of the devices tested turned out to be useful when using a humidifier like the F&P 810™ with no heated circuit. This humidifier, if set to "Low" without an active heating system of the breathing tube, should condition the gas to 28 de-

Infine, questo limite tecnico delle apparecchiature testate, diventa un aiuto quando si utilizza un umidificatore come il F&P 810™ senza circuito termoriscaldato. Questo umidificatore se posizionato sul set "Low" senza sistema di riscaldamento attivo del tubo inspiratorio, dovrebbe condizionare il gas a 28 gradi. In realtà l'elevato flusso di gas non permette di raggiungere il 100 % di UR. La quantità di UA fornita è però superiore, anche con flusso tra 60 e 90 lt/min ai 10 mg H₂O/L raccomandati. Questo set-up potrebbe essere l'ideale per l'applicazione dei sistemi di umidificazione nei pazienti sottoposti ad E-CPAP al di fuori delle aree intensive.

Conclusioni

Nel paziente sottoposto a E-CPAP ad alto flusso, se non vengono utilizzati degli umidificatori attivi esiste un problema di sotto-umidificazione delle vie aeree. Il problema emerge quando la FiO₂ erogata è maggiore del 60% durante l'utilizzo dei sistemi Venturi ed in ogni condizione quando l'elmetto è alimentato dai gas medicali.

I moderni di umidificazione attiva termoriscaldati, mediate i software NIV sono in grado di fornire una umidità assoluta superiore ai 10 mgH₂O/L. La temperatura ideale a cui condizionare il gas nella camera di umidificazione dovrebbe essere prossima ai 26°, con un gradiente di temperatura crescente verso il paziente, al fine di evitare la formazione della condensa all'interno dell'elmetto. Ulteriori studi di tipo clinico (in vivo) sono necessari per confermare i presenti risultati su popolazioni numericamente e clinicamente più ampie.

Tabella 1 – Temperatura, Umidità assoluta e relativa all'interno di un elmetto durante CPAP a flusso continuo con sistema Venturi

Flusso di gas (L/min)	FiO ₂ %	Temperatura°	UA (mg H ₂ O/lt)	UR %
30	0.40	23.8±0.1	3.6±0.1	16.5
	0.60	23.0±0.1	3.0±0.1	14.4
	0.80	23.0±0.2	1.5±0.1	7.1
60	0.40	23.6±0.1	3.6±0.1	14.3
	0.60	23.0±0.1	2.0±0.2	9.0
	0.80	23.0±0.2	0.5±0.1	2.7
90	0.40	23.2±0.1	3.6±0.2	17.0
	0.60	23.0±0.1	2.0±0.1	9.0
	0.80	23.0±0.2	0.5±0.1	2.7

Legenda: Temperatura stanza 23.20°, UA 12 mg H₂O/L, UR 50%, FiO₂ frazione inspiratoria dell'ossigeno

grees. In reality, high gas flow does not allow the 100% of RH to be reached. The quantity of AH furnished is thus greater, even with a flow between the 60 and 90 l/min, than the 10 mg H₂O/l recommended. This set-up could be ideal for the application of humidification systems of patients subjected to H-CPAP in non-Intensive ward.

Conclusions

If active humidifiers are not used in patients subjected to high flow H-CPAP, an under-humidification problem would trigger in the airways. The problem arises when the FiO₂ delivered is higher than 60% when using the Venturi systems and in every condition when the helmet is fed by medical gases. The modern active heated humidifiers through NIV software are able to deliver an absolute humidity above 10 mgH₂O/l. The ideal temperature at which the gas in the humidification chamber should be heated is close to 26°C, with an increasing temperature gradient towards the patient in order to avoid the formation of condensation inside the helmet. Further clinical *in vivo* studies are needed to confirm these current results and should be carried out on a numerically and clinically broader basis.

Table 1 – Temperature, absolute and relative humidity inside a helmet during continuous flow CPAP delivered with the Venturi system.

Gas flow (l/min)	FiO ₂ %	Temperature°	AH (mg H ₂ O/l)	RH %
30	0.40	23.8±0.1	3.6±0.1	16.5
	0.60	23.0±0.1	3.0±0.1	14.4
	0.80	23.0±0.2	1.5±0.1	7.1
60	0.40	23.6±0.1	3.6±0.1	14.3
	0.60	23.0±0.1	2.0±0.2	9.0
	0.80	23.0±0.2	0.5±0.1	2.7
90	0.40	23.2±0.1	3.6±0.2	17.0
	0.60	23.0±0.1	2.0±0.1	9.0
	0.80	23.0±0.2	0.5±0.1	2.7

Legend: Room temperature 23.20°C, AH 12 mg H₂O/l, RH 50%, FiO₂ fraction of inspired oxygen

Tabella 2 – Temperatura, Umidità assoluta e relativa all'interno di un elmetto durante CPAP a flusso continuo con sistema Venturi e utilizzo dell'umidificatore Fischer and Paykel 810™.

Flusso di gas (L/min)		FiO ₂ 0.40	FiO ₂ 0.60	FiO ₂ 0.80
30	Temp°	29.0±0.1	29.0±0.3	29.0±0.2
	UA (mg H ₂ O/L)	19.0±0.1	18.2±0.4	16.9±0.4
	UR (%)	66.7	63.8	56.0
60	Temp°	28.5±0.1	28.0±0.1	28.1±0.1
	UA (mg H ₂ O/L)	14.0±0.3	13.3±0.4	12.0±0.1
	UR (%)	51.0	49.0	42.0
90	Temp°	28.5±0.1	28.0±0.1	27.0±0.2
	UA (mg H ₂ O/L)	11.0±0.2	10.8±0.3	10.5±0.1
	UR (%)	42.0	40.0	38.0

Legenda: FP810 set low: l'umidità assoluta teoricamente erogata corrisponde all'umidità assoluta del gas saturo alla temperatura impostata sulla camera di umidificazione (28°C con 100% di UR = 27.1 mg H₂O/L).

Temperatura stanza : 23.20°, UA 12 mg H₂O/L, UR 50%.

Tabella 3 – Temperatura, Umidità assoluta e relative all'interno di un elmetto durante CPAP a flusso continuo generato con gas medicali durante l'utilizzo di diversi sistemi di umidificazione attiva termo riscaldata.

Flusso Gas (L/min)		H.C. 2000 Niv Mode	F.P. 810 Set Low	F.P. 850 NIV mode	Hudson Neptune NIV mode
UA teorica (mg H ₂ O/L)		24.0	24.0	32.1	28.1
Set umidificatore		26° - 28°	26° - 28°	31° - 34°	28° - 30°
30	Temp°	28.0±0.3	29.3±0.3	29.6±0.1	29.3±0.2
	UA (mg H ₂ O/L)	20.2±0.1	16.4±0.1	16.4±0.2	18.5±0.2
	UR (%)	74.1	56.5	56.5	63.5
60	Temp°	27.8±0.1	28.5±0.1	29.3±0.1	29.6±0.3
	UA (mg H ₂ O/L)	19.1±0.2	11.2±0.2	11.4±0.1	12.7±1.2
	UR (%)	70.2	40.1	40.3	44.7
90	Temp°	27.5±0.3	27.2±0.4	29.4±0.7	28.5±0.3
	UA (mg H ₂ O/L)	18.3±0.3	10.4±0.3	10.3±0.4	11.4±0.2
	UR (%)	69.6	38.5	35.4	40.3

Legenda: Temperatura stanza: 23.20°, UA 12 mg H₂O/L, UR 50%.

L'umidità assoluta teoricamente erogata corrisponde all'umidità assoluta del gas saturo alla temperatura impostata sulla camera di umidificazione.

Set Umidificatore: temperature di lavoro della camera di umidificazione e temperatura alla fine del circuito termoriscaldato (ingresso gas nell'elmetto).

Table 2 – Temperature, Absolute and relative humidity inside a helmet during continuous-flow CPAP delivered via the Venturi system and using the humidifier Fischer and Paykel 810™ (FP 810).

Gas flow (l/min)		FiO ₂ 0.40	FiO ₂ 0.60	FiO ₂ 0.80
30	Temp°	29.0±0.1	29.0±0.3	29.0±0.2
	AH (mg H ₂ O/L)	19.0±0.1	18.2±0.4	16.9±0.4
	RH (%)	66.7	63.8	56.0
60	Temp°	28.5±0.1	28.0±0.1	28.1±0.1
	AH (mg H ₂ O/L)	14.0±0.3	13.3±0.4	12.0±0.1
	RH (%)	51.0	49.0	42.0
90	Temp°	28.5±0.1	28.0±0.1	27.0±0.2
	AH (mg H ₂ O/L)	11.0±0.2	10.8±0.3	10.5±0.1
	RH (%)	42.0	40.0	38.0

Legend: FP810 set to low: the absolute humidity theoretically delivered corresponds to the absolute humidity of the saturated gas at the temperature set on the humidification chamber (28°C with 100% of RH = 27.1 mg H₂O/L).

Room temperature: 23.20°C, AH 12 mg H₂O/L, UR 50%.

Table 3 – Temperature, Absolute and relative humidity inside a helmet during continuous-flow CPAP generated with medical gases with the use of various heated, active humidification systems.

Gas Flow (l/min)		H.C. 2000 NIV Mode	F.P. 810 Set Low	F.P. 850 NIV mode	Hudson Neptune NIV mode
Theoretic AH (mg H ₂ O/l)		24.0	24.0	32.1	28.1
Humidifier Setting		26° - 28°	26° - 28°	31° - 34°	28° - 30°
30	Temp°	28.0±0.3	29.3±0.3	29.6±0.1	29.3±0.2
	AH(mg H ₂ O/l)	20.2±0.1	16.4±0.1	16.4±0.2	18.5±0.2
	RH (%)	74.1	56.5	56.5	63.5
60	Temp°	27.8±0.1	28.5±0.1	29.3±0.1	29.6±0.3
	AH (mg H ₂ O/l)	19.1±0.2	11.2±0.2	11.4±0.1	12.7±1.2
	RH (%)	70.2	40.1	40.3	44.7
90	Temp°	27.5±0.3	27.2±0.4	29.4±0.7	28.5±0.3
	AH(mg H ₂ O/l)	18.3±0.3	10.4±0.3	10.3±0.4	11.4±0.2
	RH (%)	69.6	38.5	35.4	40.3

Legend: Room temperature: 23.20°C, AH 12 mg H₂O/L, RH 50%.

The absolute humidity theoretically delivered corresponds to the absolute humidity of the saturated gas at the temperature set on the humidification chamber.

Humidifier Setting: working temperature of the humidification chamber and temperature at the end of the heated circuit (gas inlet port of the helmet).

Figura 1 – Set-up fase “in vitro” senza umidificatori attivi

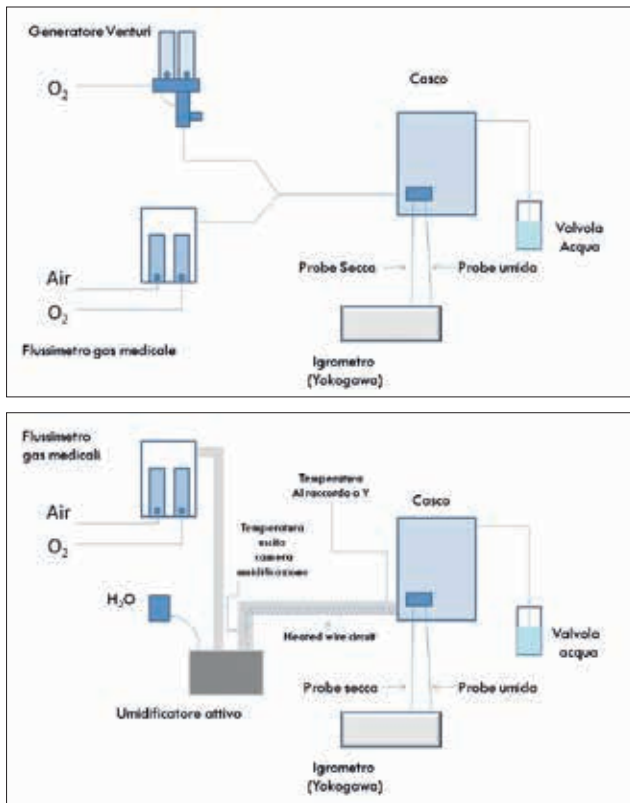


Figure 1 – “In vitro” set-up phase without active humidifiers

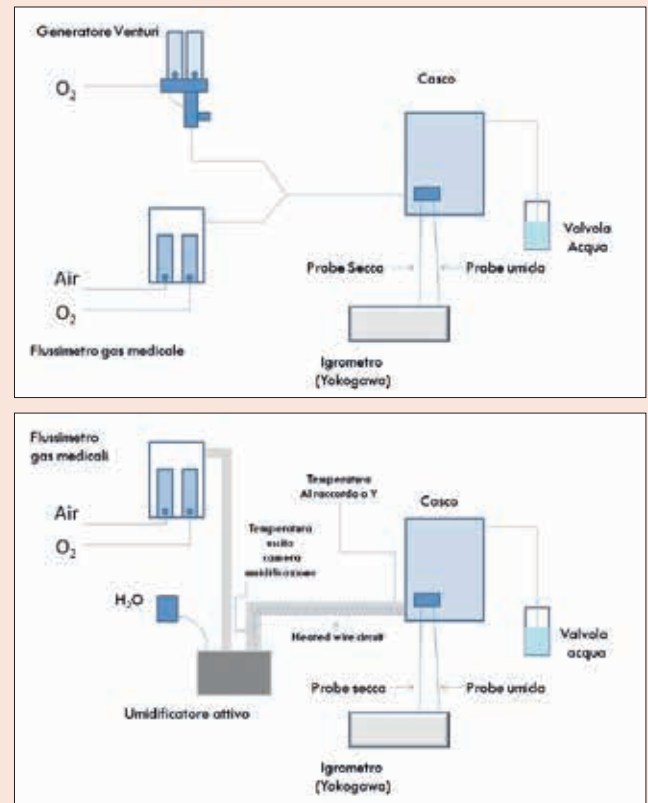


Figura 2 – Set-up fase “in vitro” con umidificatori attivi

Take Home messages:

1. Durante CPAP con elmetto, i gas inspirati, se non umidificati attivamente, non raggiungono il contenuto di vapore acqueo raccomandato dalla letteratura.
2. Le temperature registrate all’interno dell’elmetto in pazienti sottoposti a CPAP a flusso continuo sono simili a quelle registrate nei pazienti sottoposti a ventilazione in maschera facciale.
3. Con i sistemi Venturi il problema si presenta quando le Frazioni inspiratorie dell’ossigeno sono superiori a 0.6
4. In caso di utilizzo degli umidificatori attivi termoriscaldati le temperature delle camere di umidificazione devono essere impostate tra 26° e 28°
5. I moderni sistemi di umidificazione attiva sono in grado, se impostati correttamente, di fornire un corretto contenuto di vapore acqueo.

Figure 2 – “In vitro” set-up phase with active humidifiers

Take Home tips:

1. During CPAP with helmet ventilation, the gases inspired, if not actively humidified, do not reach the water vapor content recommended in literature.
2. The temperatures registered inside the helmets of patients subjected to continuous flow CPAP resemble those recorded in patients subjected to facial mask ventilation.
3. With the Venturi systems the problem arises when the inspiratory fraction of oxygen is greater than 0.6
4. When using active heated humidifiers the temperature of the humidification chambers should be set between 26° and 28°
5. If correctly set, the modern active humidification systems are able to furnish the correct water vapor content.

Bibliografia

1. CRIMI C, NOTO A, PRINCI P, et al. *A European survey of noninvasive ventilation practices*. Eur Respir J. 2010;36:362-9.
2. FERRER M, SELLARES J, TORRES A. *The use of noninvasive ventilation by Italian physicians in the clinical practice*. Minerva Anestesiol. 2011;77:941-2.
3. CRIMI C, NOTO A, PRINCI P, et al. *Survey of noninvasive ventilation practices: a snapshot of Italian practice*. Minerva Anestesiol. 2011;77:971-8.
4. SQUADRONE V, COHA M, CERUTTI E, et al. *Continuous positive airway pressure for treatment of postoperative hypoxemia: a randomized controlled trial*. JAMA. 2005 2;293:589-95.
5. BELLANI G, PATRONITI N, GRECO M, et al. *The use of helmets to deliver noninvasive continuous positive airway pressure in hypoxemic acute respiratory failure*. Minerva Anestesiol. 2008;74:651-6.
6. PRINCIPALI T, PANTANETTI S, CATANI F, et al. *Noninvasive continuous positive airway pressure delivered by helmet in hematological malignancy patients with hypoxemic acute respiratory failure*. Intensive Care Med. 2004;30:147-50.

7. SQUADRONE V, MASSAIA M, BRUNO B, et al. *Early CPAP prevents evolution of acute lung injury in patients with hematologic malignancy* Intensive Care Med. 2010;36:1666-74.
8. LUCCHINI A, VALSECCHI D, ELLI S et al. *The comfort of patients ventilated with the Helmet Bundle*. Assist Inferm Ric. 2010;29:174-83.
9. UETA K, TOMITA T, UCHIYAMA A, et al. *Influence of humidification on comfort during noninvasive ventilation with a helmet*. Respir Care. 2013;58: 798-804.
10. CHIUMELLO D, CHIERICETTI M, TALLARINI F et al. *Effect of a heated humidifier during continuous positive airway pressure delivered by a helmet*. Crit Care. 2008;12:R55.
11. NAVA S, NAVALESI P, GREGORETTI C. *Interfaces and humidification for noninvasive mechanical ventilation*. Respir Care. 2009;54:71-84.
12. ESQUINAS RODRIGUEZ AM, SCALA R, SOROKSKY A et al. Clinical review: humidifiers during noninvasive ventilation—key topics and practical implications. Crit Care. 2012;16:203.
13. ESQUINAS A, ESCOBAR C, CHAVEZ A et al. *Noninvasive mechanical ventilation and humidification in acute respiratory failure. A morpho histological and clinical study of side effects*. Am J Respir Crit Care Med 2002, 165:A385.
14. ESQUINAS A, NAVA S, SCALA R, et al. *Humidification and difficult endotracheal intubation in failure of noninvasive mechanical ventilation (NIV). Preliminary results*. Am J Respir Crit Care Med 2008, 177:A644.
15. American National Standards Institute; American Society of Anesthesiologists. *Standard for humidifiers and nebulizers for medical use*. ANSI 1979;Z79:9.
16. International Consensus Conferences in Intensive Care Medicine: noninvasive positive pressure ventilation in acute Respiratory failure. Am J Respir Crit Care Med 2001, 163:283-291.
17. PATRONITI N, FOTI G, MANFIO A, et al. *Head helmet versus face mask for noninvasive continuous positive airway pressure: a physiological study*. Intensive Care Med. 2003;29:1680-7.
18. TACCONE P, HESS D, CAIRONI P, et al. *Continuous positive airway pressure delivered with a "helmet": effects on carbon dioxide rebreathing*. Crit Care Med 2004;32:2090-2096.
19. CHIUMELLO D, PELOSI P, CARLESSO E, et al. *Noninvasive positive pressure ventilation delivered by helmet vs. standard face mask*. Intensive Care Med. 2003;29:1671-9.
20. RESTREPO RD, WALSH BK American Association of Respiratory Care (AARC). *Humidification during invasive and noninvasive mechanical ventilation: 2012*. Respir Care. 2012;57:782-8.
21. NISHIDA T, NISHIMURA M, FUJINO Y et al. *Performance of heated humidifiers with a heated wire according to ventilatory settings*. J Aerosol Med 2001;14:43-51
22. LELLOUCHE F, MAGGIORE SM, LYAZIDI A et al. *Water content of delivered gases during noninvasive ventilation in healthy subjects*. Intensive Care Med 2009;35:987-995.