

Strumenti per la misura dell'umidità

1) Igrometro a capello

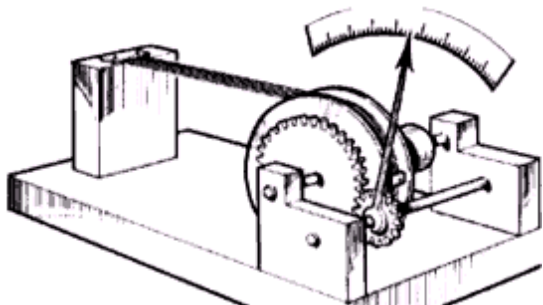


Figura 3

L'igrometro a capello è uno strumento di misura dell'umidità di comune utilizzo. Nonostante questo non sia uno degli strumenti più precisi, viene ancora oggi utilizzato in alcune piccole stazioni meteorologiche meccaniche, ed all'interno di musei dove occorre monitorare costantemente l'umidità per preservare nel tempo le opere d'arte.

Si basa su un semplice principio fisico: i capelli e i peli animali si contraggono o allungano a seconda dell'umidità dell'aria. Nello schema di *Figura 4*, al variare dell'umidità varia leggermente la lunghezza del fascio di capelli (composto da capelli e peli di vario tipo, in modo da migliorarne l'accuratezza); questo provoca la rotazione della ruota dentata appoggiata al binario collocato al lato del fascio. La ruota più piccola amplifica la rotazione (si tratta di un moltiplicatore) e permette lo spostamento della lancetta che riferisce il valore di umidità relativa sulla scala graduata. Questo metodo non è eccessivamente preciso: la variazione di dimensione del fascio *non è lineare*, inoltre di norma la taratura che viene effettuata solo a 20°C, amplificando così quei comportamenti anomali al di fuori di questa temperatura.

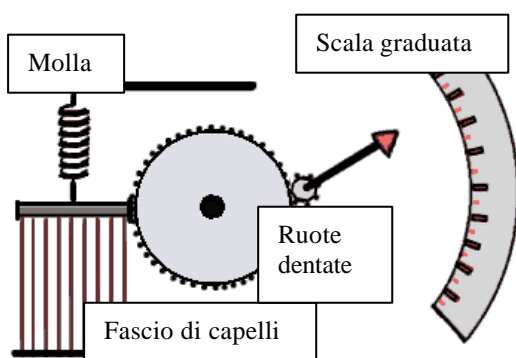


Figura 4

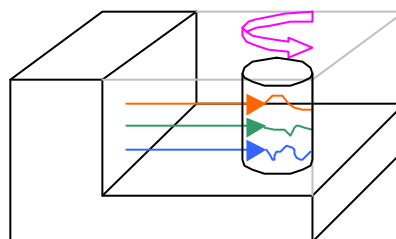


Figura 5

A sinistra: schema di funzionamento di un igrometro a capello.

In alto: schematizzazione di una centralina meteo.

Spesso al posto della scala graduata si trova un rullo di carta che ruota lentamente, ed al posto della lancetta un pennino; in questo modo i dati vengono registrati su carta quindi analizzabili in un secondo momento. In *Figura 5* è rappresentato un esempio di centralina meteo con rullo che effettua un giro completo (solitamente in 24 ore oppure una settimana). Il rullo è visibile ma coperto da una vaschetta di plexiglas. I dati registrati sono tre: umidità, temperatura e pressione.

Questo tipo di strumenti si trova spesso in ambienti dove è necessario un monitoraggio completo delle condizioni dell'ambiente, come per esempio in un museo (dove valori di umidità o temperatura fuori norma potrebbero danneggiare le opere d'arte). Esistono anche versioni elettroniche di queste centraline, più comode in molti casi, ma le cui registrazioni non hanno valore legale (perché facili da manomettere).

2) Metodo della pesata

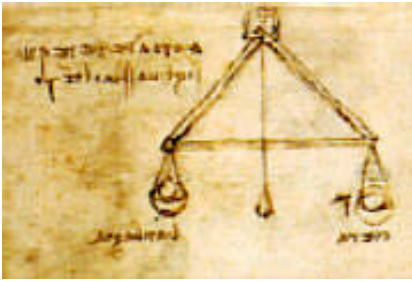


Figura 6

È uno dei metodi per la misura del grado igrometrico più semplice e antico (tant'è vero che una particolare versione di questo sistema era già stata usata da Leonardo da Vinci). In *Figura 6* è riportato proprio il progetto originale dell'inventore. Leonardo lo utilizzava come strumento per le previsioni meteorologiche, verificando le variazioni di umidità

Questo metodo sfrutta la proprietà di alcuni materiali d'assorbire facilmente l'acqua presente nell'aria (come la bambagia, usata nel progetto originale). Assorbendo acqua questi aumentano il proprio peso. Ponendo su uno dei piatti della bilancia la sostanza campione prima e dopo un certo tempo, si verifica di quanto è aumentato il suo peso. La quantità ottenuta è semplicemente il valore della massa d'acqua assorbita, e conoscendo la massa d'aria oggetto della misura, si ottiene subito il titolo.

Un'applicazione più moderna è un tubo con due griglie laterali, che lasciano passare l'aria ma non il materiale contenuto nel tubo. Al suo interno vengono posti cristalli di gel di silice o di acido solforico anidro, aria umida viene fatta passare attraverso una delle griglie, uscendo dall'altro. Al termine della misura si conosce la massa di acqua presente nell'aria originale (semplice differenza in massa tra la fine e l'inizio della misura).

3) Igrometro elettronico



Figura 9

Per una gran parte delle applicazioni di uso comune, l'igrometro elettronico è lo strumento ideale. I dati di tipo elettronico infatti sono facilmente trattabili e registrabili, e possono essere acquisiti da microprocessori, che comandano attuatori di vario tipo (ad esempi nei condizionatori d'aria, che a seconda del dato di umidità dell'ambiente, modificano il proprio modo di funzionamento).

L'igrometro elettronico è composto dal trasduttore (che può essere di tipo resistivo o capacitivo, ossia un condensatore che varia la propria capacità al variare del grado igrometrico dell'aria, come è mostrato in *Figura 10*) e dal circuito di condizionamento.

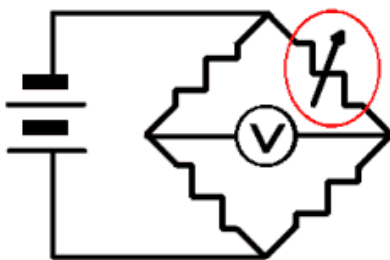


Figura 10

Se il sensore è di tipo resistivo (varia la propria resistenza in funzione dell'umidità) viene utilizzato per il condizionamento del segnale un ponte di Wheatstone, preferito grazie alla sua notevole sensibilità alla variazione di una delle resistenze sui suoi rami. Un schema semplice di ponte di Wheatstone è rappresentato in *Figura 10*.

Il resistore variabile (evidenziato in rosso) è il trasduttore. Questo circuito ha la particolarità di imporre una tensione nulla sul voltmetro quando è bilanciato, ossia quando le resistenze sui quattro

rami sono uguali. Quindi una piccola variazione della resistenza su un ramo (quello contenente il sensore), corrisponde ad una grande variazione di tensione sul voltmetro. In realtà al posto del voltmetro può essere messo un qualsiasi circuito di condizionamento, per esempio un amplificatore seguito da un convertitore A/D che trasmette il segnale numerico ad un microprocessore (o microcontrollore) che lo analizza, lo registra o prende delle decisioni in base al valore acquisito.

4) Analizzatore Drager



Figura 11

La Drager è una azienda tedesca che produce un particolare tipo di strumentazione di misura, composta da due parti fondamentali: un analizzatore e delle fiale.

L'analizzatore (vedi *figura 11*) è una sorta di fisarmonica, con uno o più buchi su un lato, di circa 1 cm di diametro e 15 cm di profondità, che possono ospitare ciascuno una speciale fialetta.

Premendo l'analizzatore (proprio come una fisarmonica) si forza una quantità fissa e nota di aria (per molti modelli sono 100cm^3) ad entrare nella fialetta. A questo punto le sostanze chimiche contenute in quest'ultima reagiscono con l'aria cambiando colore proporzionalmente alla grandezza da misurare. Le fiale stesse sono graduate, in modo renderne immediata la lettura.

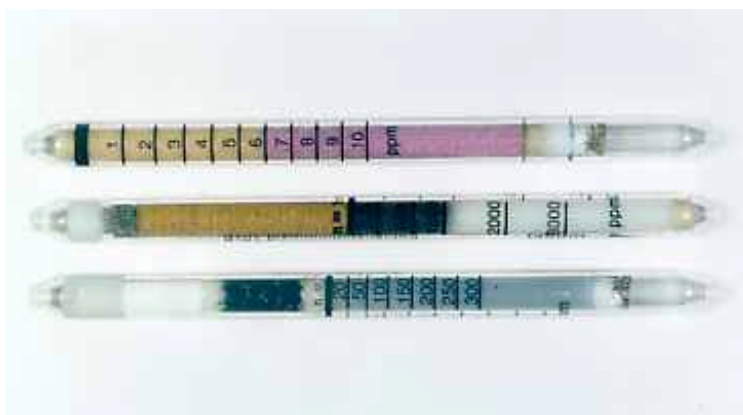
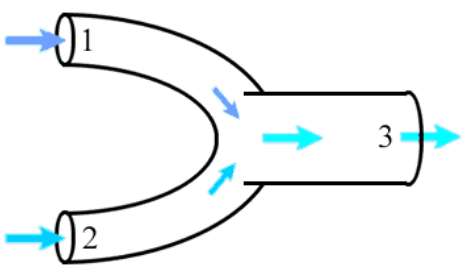


Figura 12

Sono disponibili fiale di diverso tipo, ciascuna in grado di effettuare una misura differente. Vi sono fiale per la misura del grado igrometrico, altre capaci di verificare la presenza di gas tossici o infiammabili, altre ancora per l'analisi del livello di radioattività. Nella *Figura 12* sono visibili alcuni esempi di fiale (già usate). Questo metodo di misura ha innegabili vantaggi di praticità e semplicità d'uso, oltre ad essere piuttosto economico se il numero di misure da effettuare è limitato. E' per questo che l'analizzatore Drager è utilizzato correntemente dai vigili del fuoco, per esempio per le analisi dell'aria in ambienti potenzialmente contaminati. Lo svantaggio è che le fiale (oltre ad avere un tempo di vita limitato) sono usa e getta (dopo la rottura delle due chiusure laterali vanno usate immediatamente, e terminata la misura diventano inutilizzabili), quindi se le misure da effettuare sono tante, può essere più conveniente uno strumento con un più basso costo di mantenimento.

Applicazioni



Si tratta di un componente adiabatico e meccanicamente isolato ($\dot{Q}=0$, $\dot{L}=0$). Dai tubi 1 e 2 entrano due diverse correnti di aria umida, che escono miscelate da 3. Note le caratteristiche delle correnti in 1 e 2, trovare quelle in 3.

Figura 16

1 → $\dot{M}_{A_1} = 400 \frac{kg_A}{h}$ $T_1 = 32^\circ C$ $\phi_1 = 0,8$
 2 → $\dot{M}_{A_2} = 800 \frac{kg_A}{h}$ $T_2 = 26^\circ C$ $\phi_2 = 0,5$

Soluzione

Essendo in condizioni di regime stazionario, abbiamo

$$\dot{M}_{A_3} = \dot{M}_{A_1} + \dot{M}_{A_2} = 1200 \frac{kg_A}{h}$$

mentre facendo il bilancio di massa del vapore acqueo

$$\dot{M}_{V_3} = \dot{M}_{V_1} + \dot{M}_{V_2} \Leftrightarrow x_3 \dot{M}_{A_3} = x_1 \dot{M}_{A_1} + x_2 \dot{M}_{A_2}$$

ma x_1 e x_2 possono essere facilmente determinati con la (4) (per ciascuna corrente è nota la temperatura e il grado igrometrico)

$$x_1 = 0,622 \frac{\phi_1 P_s(32^\circ C)}{1 - \phi_1 P_s(32^\circ C)} = 0,622 \frac{0,8 \cdot 0,04753}{1 - 0,8 \cdot 0,04753} = 0,0246 \frac{kg_V}{kg_A}$$

dove il valore di 0,04753 è ottenuto dalle tabelle del vapore. Analogamente

$$x_2 = 0,622 \frac{\phi_2 P_s(26^\circ C)}{1 - \phi_2 P_s(26^\circ C)} = 0,622 \frac{0,5 \cdot 0,03360}{1 - 0,5 \cdot 0,03360} = 0,0106 \frac{kg_V}{kg_A}$$

di conseguenza troviamo immediatamente il valore del titolo della corrente d'uscita

$$x_3 = \frac{x_1 \dot{M}_{A_1} + x_2 \dot{M}_{A_2}}{\dot{M}_{A_3}} = \frac{0,0246 \cdot 400 + 0,0106 \cdot 800}{1200} = 0,0153 \frac{kg_V}{kg_A}$$

A questo punto ho definito due punti ben precisi sul diagramma psicrometrico e la soluzione cercata si trova sulla congiungente dei due punti. Ragionando a spanne potremmo dire che la soluzione è il punto di media pesata (rispetto alla massa) dei i punti 1 e 2. Continuiamo però con una soluzione più rigorosa, effettuando il bilancio dell'energia

$$\sum_i \dot{M}_{A_i} J_i = \dot{Q} - \dot{L} = 0$$

dove J_i rappresenta l'entalpia specifica dell'aria nel punto i esimo (e \dot{M}_{A_i} la relativa portata in massa). Il lavoro e il calore scambiati sono nulli, per le ipotesi di adiabaticità e isolamento meccanico del miscelatore fatte all'inizio dell'esercizio. Dalla formula precedente si ottiene

$$\dot{M}_{A_3} J_3 = \dot{M}_{A_1} J_1 + \dot{M}_{A_2} J_2$$

e, calcolando J_1 e J_2 usando la (6) otteniamo

$$J_1 = t_1 + x_1 \cdot (2500 + 1,9 \cdot t_1) = 32 + 0,0246 \cdot (2500 + 1,9 \cdot 32) = 95 \frac{kJ}{kg_A}$$

e analogamente

$$J_2 = t_2 + x_2 \cdot (2500 + 1,9 \cdot t_2) = 26 + 0,0106 \cdot (2500 + 1,9 \cdot 26) = 53 \frac{kJ}{kg_A}$$

quindi

$$J_3 = \frac{\dot{M}_{A_1} J_1 + \dot{M}_{A_2} J_2}{\dot{M}_{A_3}} = \frac{400 \cdot 95 + 800 \cdot 53}{1200} = 67 \frac{kJ}{kg_A}$$

A questo punto invertiamo la (6) per ottenere la temperatura dell'aria miscelata

$$t_3 = \frac{J_3 - 2500 \cdot x_3}{1 + 1,9 \cdot x_3} = \frac{67 - 2500 \cdot 0,0153}{1 + 1,9 \cdot 0,0153} = 27,9^\circ C$$

controlliamo le tabelle del vapore per conoscere il valore della pressione di saturazione alla temperatura appena ottenuta

$$P_s(27,9^\circ C) = 0,03757 \text{ BAR}$$

e applicando la (5)

$$\phi_3 = \frac{P_{tot}}{P_s(27,9^\circ C)} \frac{x_3}{x_3 + 0,622} = \frac{1}{0,03757} \frac{0,0153}{0,0153 + 0,622} = 0,64 \Rightarrow U.R. = 64\%$$

Infine visualizziamo i dati relativi alle 3 correnti sul diagramma psicrometrico

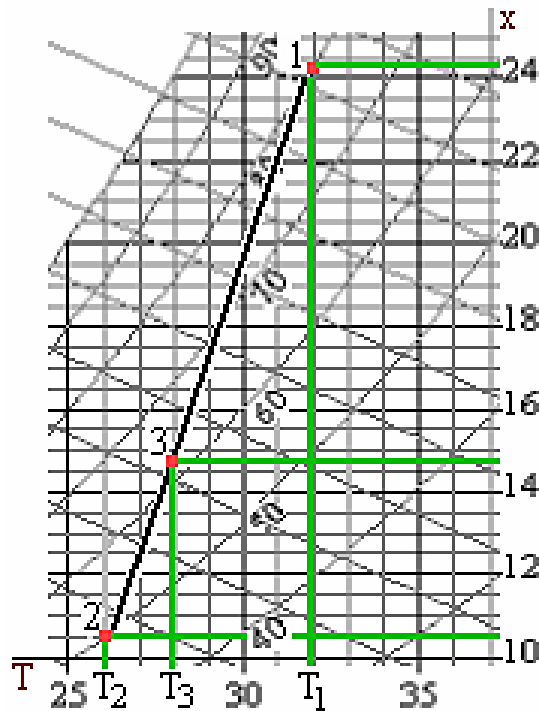


Figura 17

Come si vede dalla Figura 4, le caratteristiche della corrente uscente sono una combinazione lineare delle caratteristiche della corrente entrante.

Un interessante fenomeno che si può facilmente comprendere dal diagramma psicrometrico e dalla trattazione del precedente esercizio è la pioggia. Supponiamo che due correnti umide con lo stesso grado igrometrico ma diversa temperatura vengano a contatto: l'aria risultante dalla miscelazione avrà temperatura e titolo compresi tra i corrispondenti valori delle correnti iniziali. Il grado igrometrico invece è più alto dell'originale. Questo fatto apparentemente strano si spiega

matematicamente osservando che le curve a grado igrometrico costante sono convesse, di conseguenza ogni segmento congiungente due punti qualunque di una curva, sta sopra la curva stessa.

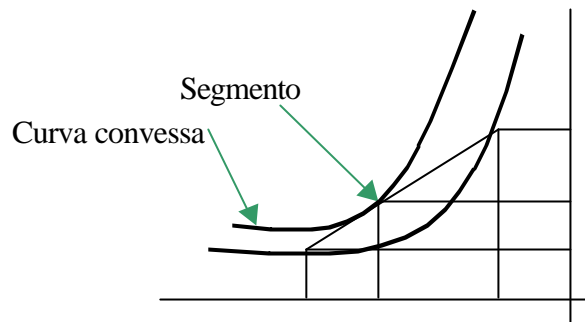


Figura 18

Quando nel cielo due correnti molto umide, una fredda e una calda, si scontrano, può succedere che la corrente risultante abbia grado igrometrico maggiore di 1, in questo caso parte del vapore si condensa e avviene il fenomeno della pioggia. Perché piova quindi non basta che l'aria ad alta quota sia umida, ma è necessario lo scontro tra masse d'aria di temperatura diversa.

Condizionatore d'aria

Un condizionatore d'aria è un componente in grado di modificare i parametri di temperatura e grado igrometrico di una corrente d'aria calda iniziale, che viene trasformata in una corrente più fredda e secca all'uscita.

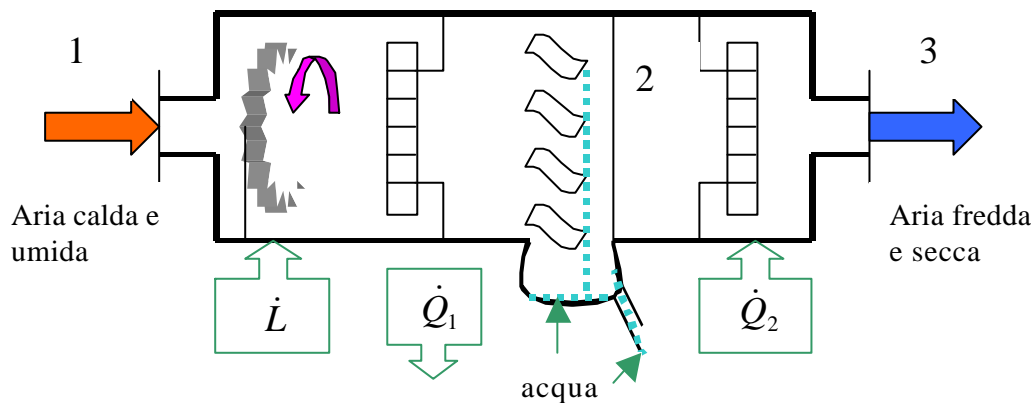


Figura 19

Un condizionatore (Figura 19) in generale è composto da 4 elementi fondamentali. Innanzitutto una ventola, che facilita l'afflusso d'aria, e in figura è rappresentata da una potenza \dot{L} entrante. Immediatamente dopo l'aria incontra una serpentina di raffreddamento (per esempio il condensatore di una macchina frigorifera) che le sottrae una calore per unità di tempo \dot{Q}_1 , in modo da portarla alla temperatura di rugiada. Le alette che si trovano subito dopo hanno il compito di raccogliere la condensa formatasi a causa del raffreddamento (vedi diagramma psicrometrico più sotto), formando acqua che viene incanalata in un tubicino (e poi scaricata oppure raccolta in bottiglioni per essere usata come acqua distillata). L'aria nel punto 2 è satura e troppo fredda per essere immessa in un ambiente (perché la condensazione richiede calore per avvenire, che viene sottratto dalla corrente d'aria), quindi passa attraverso l'ultima sezione del condizionatore, chiamata di post-riscaldamento,

che fornendo il calore per unità di tempo \dot{Q}_2 scalda l'aria e la rende adatta ad essere immessa nell'ambiente, come nel punto 3.

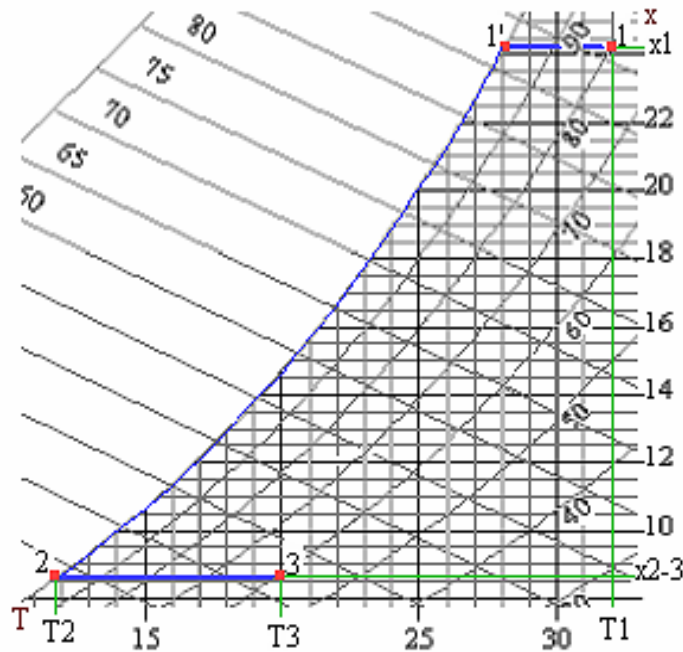


Figura 20

Vediamo cosa succede all'aria, identificando tutte le fasi di trasformazione sul diagramma psicrometrico. All'ingresso del condizionatore (punto 1) l'aria è calda (temperatura T_1) e umida. A contatto con la griglia di raffreddamento le viene sottratto il calore Q_1 , quindi raffredda fino al punto 1' (il titolo x_1 rimane costante perché le masse di aria secca e vapore restano costanti), poi comincia la condensazione accompagnata da un notevole raffreddamento fino al punto 2, con temperatura T_2 (come si può vedere l'entalpia specifica della massa d'aria cala rapidamente). Inoltre anche il titolo cala (al valore x_2), perché una parte del vapore d'acqua condensa mentre la massa d'aria secca resta costante (evidentemente quindi il rapporto M_V/M_A scende), mentre il grado igrometrico rimane costantemente 1 (aria umida satura). A questo punto l'aria molto fredda viene post-riscaldata fornendole un calore Q_2 , portandosi a una temperatura T_3 superiore, mentre il nuovo valore del titolo resta costante ($x_2 = x_3$) ma cala l'umidità relativa.

Esempio numerico

$V = 470m^3$ rappresenta il volume complessivo dell'ambiente, che si vuole condizionare ad un volume all'ora (significa che l'intero volume d'aria deve entrare nel condizionatore esattamente una volta all'ora), quindi la portata in volume dell'aria ingresso

$$\dot{V}_1 = 470 \frac{m^3}{h}$$

ed inoltre sono note le caratteristiche di questa aria

$$T_1 = 32^\circ C \quad \phi_1 = 0,8$$

Nota inoltre che l'aria in uscita deve avere

$$T_2 = 20^\circ C \quad \phi_2 = 0,5$$

e la potenza della ventola sviluppata dalla ventola vale

$$\dot{L} = 450W$$

determinare i calori per unità di tempo \dot{Q}_1 e \dot{Q}_2 scambiati nel condizionatore.

Dapprima possiamo facilmente calcolare il titolo dell'aria in ingresso (x_1) come nell'esercizio precedente, quindi

$$x_1 = 0,622 \frac{\varphi_1 P_s(32^\circ C)}{1 - \varphi_1 P_s(32^\circ C)} = 0,622 \frac{0,8 \cdot 0,04753}{1 - 0,8 \cdot 0,04753} = 0,0246 \frac{kg_V}{kg_A}$$

e analogamente per il titolo dell'aria in uscita

$$x_2 = x_3 = 0,622 \frac{\varphi_2 P_s(20^\circ C)}{1 - \varphi_2 P_s(20^\circ C)} = 0,622 \frac{0,5 \cdot 0,02336}{1 - 0,5 \cdot 0,02336} = 0,0074 \frac{kg_V}{kg_A}$$

D'altra parte l'aria secca è un gas perfetto, quindi

$$P_{A_3} V_3 = M_{A_3} R_A T_3$$

e

$$P_{A_3} = P_{tot} - P_{V_3} = P_{tot} - x_3 \cdot P_s(20^\circ C) = 1 - 0,5 \cdot 0,02336 = 0,988 \text{ BAR} = 98,8 \text{ kPa}$$

quindi

$$\dot{M}_{A_3} = \frac{P_{A_3} \dot{V}_3}{R_A T_3} = \frac{0,988 \cdot 10^5 \cdot 470}{287 \cdot 293} = 552 \frac{kg}{h}$$

che rappresenta la portata in massa di aria secca in uscita (che equivale a quella di ingresso \dot{M}_{A_1}).

Possiamo quindi facilmente trovare la portata in massa dell'acqua condensata, come

$$\dot{M}_{cond} = M_{V_1} - M_{V_3} = M_{A_1} x_1 - M_{A_3} x_3 = M_{A_1} (x_1 - x_3) = 552 \cdot (0,0246 - 0,0074) = 9,5 \frac{kg}{h}$$

A questo punto facciamo il bilancio energetico della prima parte del condizionatore (comprendente i punti 1 e 2), ottenendo

$$\dot{M}_{A_1} J_1 - \dot{M}_{A_2} J_2 - \dot{M}_{cond} h_l = \dot{Q}_1 - \dot{L}$$

dove h_l rappresenta l'entalpia specifica dell'acqua liquida in fase di condensazione. La temperatura di quest'ultima può essere estrapolata dal diagramma psicrometrico oppure dalle tabelle dell'aria satura, ottenendo

$$T_2 \approx 10^\circ C$$

(in realtà dalle tabelle si otterrebbe un valore del titolo, per aria satura alla temperatura di $10^\circ C$, pari a $0,00762 \text{ kg}_V/\text{kg}_A$ contro i $0,0074 \text{ kg}_V/\text{kg}_A$ del nostro caso, quindi con un errore ancora accettabile).

A questo punto calcoliamo le entalpie specifiche dell'aria in 1, 2 e 3, ottenendo

$$J_1 = t_1 + x_1 \cdot (2500 + 1,9 \cdot t_1) = 32 + 0,0246 \cdot (2500 + 1,9 \cdot 32) = 95 \frac{kJ}{kg_A}$$

$$J_2 = t_2 + x_2 \cdot (2500 + 1,9 \cdot t_2) = 10 + 0,0074 \cdot (2500 + 1,9 \cdot 10) = 28 \frac{kJ}{kg_A}$$

$$J_3 = t_3 + x_3 \cdot (2500 + 1,9 \cdot t_3) = 20 + 0,0074 \cdot (2500 + 1,9 \cdot 20) = 39 \frac{kJ}{kg_A}$$

mentre l'entalpia specifica dell'acqua liquida condensata

$$h_l = 4,187 \cdot t_2 = 4,187 \cdot 10 = 41,87 \frac{kJ}{kg}$$

di conseguenza sostituendo nell'equazione di bilancio energetico otteniamo

$$\dot{Q}_1 = \dot{M}_{A_1} J_1 - \dot{M}_{A_2} J_2 - \dot{M}_{cond} h_l + \dot{L} = -\frac{552}{3600} (95 - 28) + \frac{9,5 \cdot 41,87}{3600} - 0,450 = -10,6 \text{ kW}$$

dove il segno meno sta ad indicare che è un calore uscente dal sistema (sottratto dall'aria) mentre il lavoro è negativo perché effettuato sul sistema.

Infine, scrivendo l'equazione di bilancio energetico per la seconda parte del condizionatore (punti 2-3) otteniamo

$$\dot{Q}_2 = \dot{M}_{A_3} J_3 - \dot{M}_{A_2} J_2 = \frac{552}{3600} (39 - 27) = 1,8 \text{ kW}$$

che rappresenta il calore che deve essere fornito alla batteria di post-riscaldamento.