

**SALUTE SUL LAVORO.**

# La qualità dell'aria negli impianti industriali tra ricambi prescritti e parametri specifici

*IL CONTRASTO TRA RIGIDO RISPETTO DELLA NORMA VOLUMETRICA E RISPARMIO ENERGETICO***PREMESSE**

In Italia, la salubrità dell'aria dell'ambiente di lavoro è stata oggetto di interventi legislativi fin dal 1956. L'ormai abrogato DPR 303 del 19 marzo 1956 (Norme generali per l'igiene del lavoro) se ne occupava al titolo II capo I, negli articoli 6,7,8,9.

Eseguendo dei calcoli di ventilazione secondo le norme, ho avuto spesso la sensazione che quanto prescritto si scontrasse con l'esperienza di tutti i giorni. Recentemente ho deciso di approfondire l'argomento, applicando il metodo che ci ha accompagnato nei secoli ed insegnatoci nel nostro corso di laurea - misurare per descrivere e capire - e la razionalità della semplificazione a favore di sicurezza in funzione dell'obiettivo.

Il risultato ha sicuramente travalicato le aspettative, diventando uno studio multidisciplinare per la realizzazione del quale ho dovuto attingere - e spezzo una lancia a favore del vecchio ordinamento - fino ai ricordi di quanto studiato al liceo. Quanto ottenuto ho deciso di pubblicarlo in quanto a mio avviso i risultati sono di interesse generale ed in grado di accendere un dibattito importante tra colleghi.

Il caso da cui questa ricerca ha preso vita è reale: magazzini per prodotti finiti a servizio di un'attività industriale soggetta ad Haccp, di superficie complessiva 5.000 mq con altezza interna 10 m, organizzati con scaffalature metalliche e dotati di otto rampe di carico, con portoni sezionali. Il volume risulta circa 50.000 mc. Nei locali lavorano dieci addetti complessivi su due turni di 5 unità, con muletti elettrici. I locali non sono climatizzati e hanno una superficie apribile insufficiente rispetto alle prescrizioni di legge; conseguentemente, in base alle analisi di rischio, debbono obbligatoriamente essere ventilati artificialmente (chi tiene finestre da vari mq aperte in caso di freddo, vento, pioggia?).

La maggioranza degli enti di controllo richiede in questo caso il rispetto della normativa UNI 8852:1987 (Impianti di climatizzazione invernale per gli edifici adibiti ad attività industriale ed artigianale. Regole per l'ordinazione, l'offerta ed il collaudo). Tale normativa prescrive un ricambio orario pari a metà del volume, 25.000 mc/h, e comunque non minore di 15-40 mc/ora per addetto, in funzione del tipo di lavoro, come riportato in tabella 1.

Tramite l'analisi evidenzieremo come le suddette prescrizioni, non tenendo conto delle caratteristiche volumetriche degli ambienti, portino a dei dimensionamenti che lasciano perplessi.

**I. METODO**

La presenza di esseri viventi in un ambiente chiuso comporta il degrado dell'aria presente per via dell'attività respiratoria. I ricambi dell'aria negli ambienti chiusi sono necessari per mantenere l'aria in condizione di salubrità.

Per valutare le modifiche dell'aria prodotte dal catabolismo animale è stato necessario affrontare il meccanismo della respirazione dal punto di vista termochimico e biochimico. È stato calcolato il fabbisogno d'aria di una persona sia a riposo che sotto sforzo, basandosi sia su dati di letteratura che sulla base di rilevazioni e misurazioni. I risultati ottenuti sono poi stati confrontati con dati ufficiali per confermare la bontà del metodo usato. È stata quindi definita la persona con le caratteristiche

**L'AUTORE.**

L'ingegnere **Giorgio Demontis** è laureato in Idraulica e svolge la libera professione presso ESSEI Servizi srl, società di ingegneria. telefono: 328.8967225 e-mail: giorgio@demontis.net

**Riepilogo specifiche UNI 8852**

		descrizione	°C	mc/h
<b>V</b>	a	Attività pesante con continui spostamenti	10	40
	b	Attività pesante senza continui spostamenti	11	40
<b>IV</b>	c	Attività media con continui spostamenti	12	30
	d	Attività media senza continui spostamenti	13	30
<b>III</b>	e	Attività leggera con continui spostamenti	14	25
	f	Attività leggera senza continui spostamenti	15	25
<b>II</b>	g	Lavori di precisione	17	15
<b>I</b>	h	Riposo conversazione lettura studio	18	15

Tabella 1. Temperature interne di progetto in °C (4.1.6) e portate minime di ricambio mc/h per persona (4.1.4)

## 35 anni di norme

- Novembre 1974: Circolare ministero dei lavori pubblici n. 1301, *Requisiti fisico-tecnici per le costruzioni edilizie ospedaliere. Proprietà termiche, igrometriche, di ventilazione e di illuminazione.*
- Novembre 1975: legge n. 584 - *Divieto di fumare in determinati locali e su mezzi di trasporto pubblico.*
- Maggio 1976: dm "Disposizioni in ordine agli impianti di condizionamento o ventilazione di cui alla legge 11 novembre 1975, n. 584".
- Aprile 1976: legge 373 - *Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici.*
- Gennaio 1987: UNI 8852 - *Impianti di climatizzazione invernale per gli edifici adibiti ad attività industriale ed artigianale. Regole per l'ordinazione, l'offerta ed il collaudo.*
- Gennaio 1991: legge 10 - *Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia.*
- Giugno 1995: UNI EN 10339 - *Impianti aeraulici al fine di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'ordine e la fornitura.*
- Settembre 1994: decreto legislativo 626 (il titolo II - Luoghi di lavoro, disposizioni particolari - modifica gli articoli 6,7,8,9 del 303/56).
- Febbraio 1996: UNI EN 27243 - *Ambienti caldi. Valutazione dello stress termico per l'uomo negli ambienti di lavoro, basata sull'indice WBGT (temperatura a bulbo umido e del globotermometro).*
- Marzo 1996: dl 242 - *Modifiche ed integrazioni al decreto legislativo 19 settembre 1994, n. 626, recante attuazione di direttive comunitarie riguardanti il miglioramento della sicurezza e della salute dei lavoratori sul luogo di lavoro.*
- Maggio 1996: UNI EN28996 - *Ergonomia. Determinazione della produzione di energia termica metabolica.*
- Settembre 1997: UNI EN ISO 7730 - *Ambienti termici moderati. Determinazione degli indici PMV e PPD e specifica delle condizioni di benessere termico.*
- Settembre 1999: UNI EN 12515 - *Ambienti caldi. Determinazione analitica ed interpretazione dello stress termico mediante calcolo della sudorazione richiesta.*
- Settembre 2001: accordo ministero della Salute, Regioni e Province autonome - *Linee guida per la tutela e la promozione della salute negli ambienti confinati.*
- Dicembre 2003: dpcm "Attuazione dell'art. 51, comma 2 della legge del 16 gennaio 2003, n. 3, come modificato dall'art. 7 della legge 21 ottobre 2003, n. 306 in materia di tutela della salute dei non fumatori".
- Settembre 2004: UNI EN 13779:2004 - *Ventilazione degli edifici non residenziali. Requisiti di prestazione per i sistemi di ventilazione e di climatizzazione.*
- Giugno 2006: linee guida ISPESL - *Microclima, aerazione e illuminazione nei luoghi di lavoro. Requisiti e standard, indicazioni operative e progettuali.*
- Febbraio 2008: UNI EN 13779:2008 - *Ventilazione degli edifici non residenziali. Requisiti di prestazione per i sistemi di ventilazione e di climatizzazione.*
- Aprile 2008: decreto legislativo n. 81 - *Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro.*
- Agosto 2009: decreto legislativo n. 106 - *Disposizioni integrative e correttive del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro.*

più gravose in funzione dell'obiettivo. Stabilito il consumo d'aria della persona, sia a riposo sia sotto sforzo, si è valutato il degrado dei parametri dell'aria circostante conseguente all'immissione dei prodotti della respirazione nelle situazioni lavorative più gravose.

I parametri presi in considerazione sono:

- a) il contenuto di ossigeno;
- b) il contenuto di CO<sub>2</sub>;
- c) la temperatura;
- d) l'umidità;
- e) l'eventuale carica batterica.

In base a ciò sono stati determinati i ricambi d'aria necessari a garantire il mantenimento dei valori entro i limiti di soglia. Quanto ottenuto è stato confrontato con quanto richiesto dalla norma. I dati di base utilizzati nei calcoli sono stati presi da database ufficiali di enti governativi USA.

### I.1 - Valori di base adottati.

Dato il tipo di calcolo, i coefficienti di sicurezza usati, l'approssimazione dei valori presenti in letteratura, verranno usati per semplicità dei valori arrotondati.

Conversioni. Nelle conversioni si è adottato il valore 4.184 J per una kilocaloria e 860 kcal per un kWh.

Può essere utile rammentare che una mole di qualunque sostanza aeriforme in condizioni standard occupa circa 22,414 litri.

Una mole di sostanza contiene un numero di Avogadro (6,022 10<sup>23</sup>) di particelle della sostanza. Una grammomole è la massa in grammi di una mole della sostanza. Ingegneristicamente la massa (SI) ed il peso (Giorgi) coincidono numericamente. Quanto espresso potrà quindi utilizzarsi anche per i ragionamenti in peso.

**Aria.** La composizione in volume dell'aria secca presa come riferimento (Nasa, *Earth Fact Sheet*, 2009) è circa 78% azoto (78,08%), 20,95% ossigeno, 0,038% CO<sub>2</sub> (380 ppm). Il suo peso specifico (0°C, 1 Atm) risulta pari a 1,294 kg/mc ed il suo peso molare è pari a 28,98 g/mole.

La densità dell'aria secca si riduce a 1,205 kg/mc a 20°C e 1,184 kg/mc a 25°C.

Le condizioni termoigrometriche di partenza sono state considerate pari a 20°C e 45% UR.

Il calore specifico dell'aria secca a pressione costante adottato vale 1.005 J/kg°C o 240,2 cal/kg°C (per T comprese fra -50°C e +40°C).

Nel seguito si assume che la massa di una mole di aria valga circa 29 grammi, di una mole di azoto 28 g, di una mole di ossigeno 32 g, di una mole di CO<sub>2</sub> 44 g.

**Energia.** I valori delle entalpie di combustione sono stati ripresi dal *Chemistry WebBook* pubblicato gratuitamente online dal National Institute of Standards and Technology (NIST), un ente istituzionale governativo americano.

Il valore dell'entalpia di combustione del glucosio (CAS 492-62-6) è

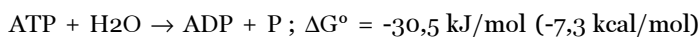
$$2.805 \text{ kJ/mol } \pm 1,3 \text{ o } 670,4 \text{ kcal/mol } \pm 0,31$$

Il valore dell'entalpia di combustione dell'acido palmitico (CAS 57-10-3) è:

$$9.977,6 \text{ kJ/mol } \pm 8,8 \text{ o } 2.384,7 \text{ kcal/mol } \pm 2,1$$

L'acido palmitico ha una temperatura di fusione pari a 335 °K, circa 62 °C. A 37 °C è quindi ancora solido.

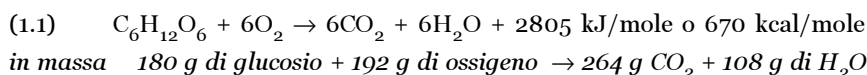
Alla trasformazione di ATP (CAS 56-65-5) in ADP (CAS 58-64-0) è stato attribuito il valore di 30,5 kJ/mole. L'ATP è un vettore energetico, ha il ruolo del R407C in una pompa di calore o di un camion nel movimento terra. L'equazione è:



ATP, caratterizzato da tre gruppi fosforici, sta per adenosin**TRI**fosfato. ADP, caratterizzato da due gruppi fosforici, sta per adenosin**DI**fosfato. L'ATP è la molecola chiave del trasporto di energia. L'ATP libera energia trasformandosi in AdenosinDifosfato o ADP per perdita di un gruppo fosforico. L'ADP acquistando un gruppo fosforico immagazzina energia e si ritrasforma in ATP.

## 1.2 - Valori di base per il calcolo del ricambio d'aria.

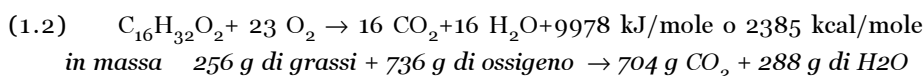
**1.2.1. Termochimica della respirazione.** La respirazione fa parte del complesso meccanismo che gli organismi superiori quale il nostro utilizzano per produrre energia. Per vivere dobbiamo necessariamente respirare. Le equazioni base semplificate della bio-combustione sono:



L'energia prodotta per grammo di glucosio risulta 15,6 kJ/g o 3,7 kcal/g.

Il rapporto fra le moli di biossido di carbonio prodotto ed ossigeno impiegato risulta: 6/6=1.

La produzione di ATP risulta pari a 38 moli. Nelle nostre cellule (eucariote) 2 moli sono impiegate nel trasporto interno cellulare per cui la produzione utile di ATP risulta 38-2=36 moli.



L'energia prodotta per grammo di grasso (acido palmitico) risulta 39,0 kJ/g o 9,3 kcal/g.

Il rapporto fra le moli di biossido di carbonio prodotto ed ossigeno impiegato risulta: 16/23=0,696.

La produzione di ATP risulta pari a 131 moli; 2 moli di ATP sono utilizzate nel processo energetico per cui la produzione utile di ATP risulta 131-2= 129 moli.

Nella respirazione assimiliamo l'ossigeno dell'aria con cui bruciamo glucosio e lipidi (grassi), i nostri combustibili, ricavandone energia, ed emettiamo come prodotti di combustione (cataboliti) biossido di carbonio (anidride carbonica), acqua e calore.

	<i>sostanza</i>	<i>peso 1 mole g</i>	<i># moli</i>	<i>peso g</i>		<i>kJ/mol</i>	<i>kJ/g</i>	<i>kcal/mol</i>	<i>kcal/g</i>
1	Glucosio	180	1	180	<i>glucosio</i>	2.805,0	15,58	670,41	3,72
2	Ossigeno	32	<b>6</b>	192		467,5	14,61	111,74	<b>3,49</b>
3	CO2	44	<b>6</b>	264		467,5	10,63	111,74	<b>2,54</b>
4	H2O	18	6	108		467,5	25,97	111,74	6,21
5	ATP		36						
6	Acido palmitico	256	1	256	<i>grasso</i>	9.978,0	38,98	2384,8	9,32
7	Ossigeno	32	<b>23</b>	736		433,8	13,56	103,69	<b>3,24</b>
8	CO2	44	<b>16</b>	704		623,6	14,17	149,05	<b>3,39</b>
9	H2O	18	16	288		623,6	34,65	149,05	8,28
10	ATP		129						
		a	b	c=a x b		d=2805/b	e=d/a	f=d/4,184	g=f/a

**1.2.2. Comparazione della combustione del glucosio e dei grassi.** Per esigenze di spazio è risultato necessario riassumere in forma tabellare i risultati. La tabella 2 contiene gli elementi di base delle nostre reazioni di combustione. Sono stati evidenziati per ogni componente i rapporti con l'energia della reazione. Ad esempio, vedi riga 2, essendo 2.805 i kJ della combustione di una mole di glucosio, ad ognuna delle 6 moli di O<sub>2</sub> impiegate competono 2.805/6=467,5 kJ/mol. Una mole di ossigeno ha massa pari a 32 g, per cui ad ogni grammo di ossigeno corrispondono 467,5/32=14,61 kJ/g. Estendendo il ragionamento agli altri elementi, si ottiene appunto la tabella 2.

Analizzando i valori caratteristici esposti in tabella 2, si evidenzia che - rispetto ai grassi - la combustione del glucosio genera, per unità di ossigeno consumato, una maggiore quantità di energia (3,49 contro 3,24 kcal/gO<sub>2</sub>, circa l'8% in più). In

Tabella 2. Energia prodotta, associata agli elementi presenti nella combustione.

tabella 3 sono rapportate le grandezze interessate dalla reazione con l'ossigeno impiegato. Lo scopo di riferire tutto all'ossigeno consumato è relativo al fatto che oggi tale valore è facilmente misurabile.

Tramite la sola misura dell'ossigeno consumato potremo determinare l'energia liberata e le quantità dei prodotti di combustione. Nei generatori determiniamo l'energia teorica liberata misurando il combustibile: nel nostro caso, essendo il combustibile interno, misuriamo il comburente, ovvero l'ossigeno assorbito dai polmoni. La resa primaria di combustione è stata determinata basandosi sul numero di moli di ATP prodotte per mole di ossigeno impiegato. L'energia considerata utile risulta quella liberata nel passaggio ATP->ADP, ovvero 7,3 kcal/mole.

A ciascuno dei 22,414 litri occupati da una mole di ossigeno competono 32/22,414=1,428 g di ossigeno. L'energia sviluppata dalla combustione di un litro di ossigeno con il glucosio risulta espressa da  $467,5/22,414 = 20,86$  kJ/litro [kJ/mole]/[litri/mole] o 4,99 kcal/litro. Questo valore sarà utile in seguito. Per i lipidi è stato usato come confronto l'acido palmitico,  $C_{16}H_{32}O_2$  (CAS 57-10-3), un acido grasso saturo a catena lunga. Avendo gli acidi grassi saturi la caratteristica fissa H/C=2 il rapporto fra l'ossigeno impiegato e l'energia liberata è praticamente costante.

Tabella 3. Resa della combustione per 1 g di ossigeno. Comparazione fra glucosio e grassi

A	B	C	D	E	F
	elementi	glucosio	grassi	UM	(C-D)/D
1	Energia totale associata ad 1 g di $O_2$	3,495	3,240	kcal/g	+7,85%
2	Grammi di $CO_2$ associati ad 1 g di $O_2$	1,375	0,957	grammi	+43,75%
3	Moli di ATP associate ad 1 g di $O_2$	0,188	0,175	moli/g	+6,98%
4	Energia (ATP) associata ad 1 g di $O_2$	1,369	1,279	kcal/g	+6,98%
5	Calore associato ad 1 g di $O_2$ (1-4)	2,126	1,961	kcal/g	+8,42%
6	Grammi di $H_2O$ associati ad 1 g di $O_2$	0,563	0,391	grammi	+43,75%
7	Resa combustione (4/1)	39,17%	39,48%		-0,81%

Ai fini degli effetti sull'aria circostante è evidente dalla tabella 3 che il massimo danno è prodotto da un individuo che bruci solo glucosio. Nei calcoli supporremo, a favore di sicurezza, un individuo non reale che utilizzi l'ossigeno assorbito per bruciare solo glucosio ed emetta prodotti di combustione (cataboliti) come se l'ossigeno utilizzato avesse bruciato solo glucosio, ovvero degradi al massimo l'ambiente circostante tramite il  $CO_2$ , il calore e l'acqua che espira.

**1.2.3. Definizione delle caratteristiche dell'espirato in funzione dell'obiettivo.** La nostra respirazione modifica la qualità dell'aria ed è come tale un'attività inquinante. Definiamo ora le caratteristiche della nostra sorgente inquinante.

Quando respiro, inspiro dell'aria così composta in volume:

78% di azoto, 20,95% di ossigeno, 0,038% di  $CO_2$  (380 ppm)

che restituisco espirando con queste caratteristiche (reali) in volume:

16,82% di ossigeno, 3,55% di  $CO_2$  (35.500 ppm).

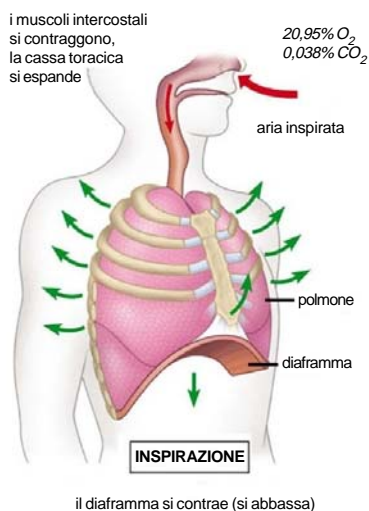
Ai fini della determinazione della sorgente inquinante noi definiamo un individuo (non reale) che restituisce l'aria inspirata con queste caratteristiche in volume, differenti dalla realtà:

19,95% di ossigeno, 5% di  $CO_2$  (50.000 ppm).

Le differenze sostanziali con il reale sono tre:

1) un diverso rapporto fra biossido di carbonio emesso ed ossigeno consumato. Detto rapporto è chiamato quoziente respiratorio o QR, nella realtà è significativamente inferiore ad 1, mediamente  $QR = [200 \text{ ml}CO_2]/[250 \text{ ml}O_2] = 0,8$ , mentre qui imponiamo che tale rapporto diventi 1: tutto l'ossigeno consumato verrà considerato riemesso in atmosfera come biossido di carbonio, ovvero  $QR = [250 \text{ ml}CO_2]/[250 \text{ ml}O_2] = 1$ , condizione sicuramente peggiorativa ai fini del degrado dell'aria circostante. Tale condizione corrisponde ad un individuo che bruci solo glucosio.

2) Tutta l'acqua prodotta dalle reazioni chimiche della respirazione si suppone



riemessa in ambiente in forma di vapore tramite il respiro o sudorazione, sappiamo che parte dell'acqua prodotta viene espulsa anche tramite altre vie.

3) Tutto il calore teorico prodotto dalle reazioni chimiche si suppone riemesso in ambiente, anche se sappiamo che circa il 40% dell'energia è utilizzata dall'organismo come energia meccanica e chimica.

In base ai valori analizzati, non sono risultate differenze significative nell'efficienza di estrazione dell'ossigeno dall'aria: per soddisfare la domanda di ossigeno l'organismo aumenta il numero di atti respiratori ed il volume inspirato, ma non l'efficienza di prelievo per litro inspirato.

**1.2.4. Valori in condizioni di riposo calcolati su dati di letteratura.**

Una persona pesante 70 kg a riposo compie mediamente 15-16 atti respiratori al minuto da 490 ml (Tidal Volume, 5-7 ml/kg, valore usato 7 ml/kg), corrispondenti a circa 7,5 litri minuto di aria inspirata. Quanto inspirato subisce una trasformazione: nel polmone vede ridurre la quantità di ossigeno ed aumentare la quantità di biossido di carbonio. L'ossigeno assorbito per atto respiratorio risulta circa il 21% del volume di ossigeno inspirato; il volume di CO<sub>2</sub> restituito risulta circa l'80-85% del volume di ossigeno assorbito per via della combustione dei grassi.

L'aria restituita ha un contenuto medio di ossigeno pari al 16,82%, diminuito quindi di circa il 20% rispetto all'ossigeno inizialmente presente.

A favore di sicurezza, abbiamo imposto nei nostri calcoli che nell'aria espirata si trovi:

- il 5% di CO<sub>2</sub> invece del 3,55% (+40,8% circa);
- il 15,95% di O<sub>2</sub> invece del 16,82% (-5,2% circa).

L'aria restituita non è quindi priva di ossigeno e contiene quantità significative di CO<sub>2</sub>.

Secondo i valori di letteratura, a riposo l'ossigeno consumato al minuto risulta circa 7,5 litri x 0,2095 x 0,197 = 310 ml/minuto. Servono 6 moli di ossigeno per bruciare una mole di glucosio.

La potenza sprigionata dalla combustione del glucosio corrisponde a: 0,31/22,414/6 x 670,4 kcal/mole = 1,545 kcal/min o 92,72 kcal/h, 107,8 W.

L'energia specifica per unità di ossigeno consumata risulta, in base ai dati considerati: 107,8 W/18,6 litriO<sub>2</sub>/h = 5,80 Wh/LitroO<sub>2</sub>. In Joule: 5,8\*3600 = 20880 J/LitroO<sub>2</sub>.

**1.2.5.- Valori di riferimento di letteratura.** A conforto di quanto espresso, riporto le tabelle UNI 28996 in cui si vede che l'energia metabolica a riposo, esposta in Watt nella UNI (potenza metabolica, quindi), coincide sostanzialmente con quanto da noi precedentemente determinato: 108 W di un uomo di 70 kg a riposo contro 115 W di un uomo a riposo da 70 kg con 1,8 mq di superficie corporea (6-7% circa di differenza).

La superficie corporea utilizzata (BSA) dall'UNI è espressa dalla formula di Dubois:

$$A=0,202 m^{0,425} H^{0,725}$$

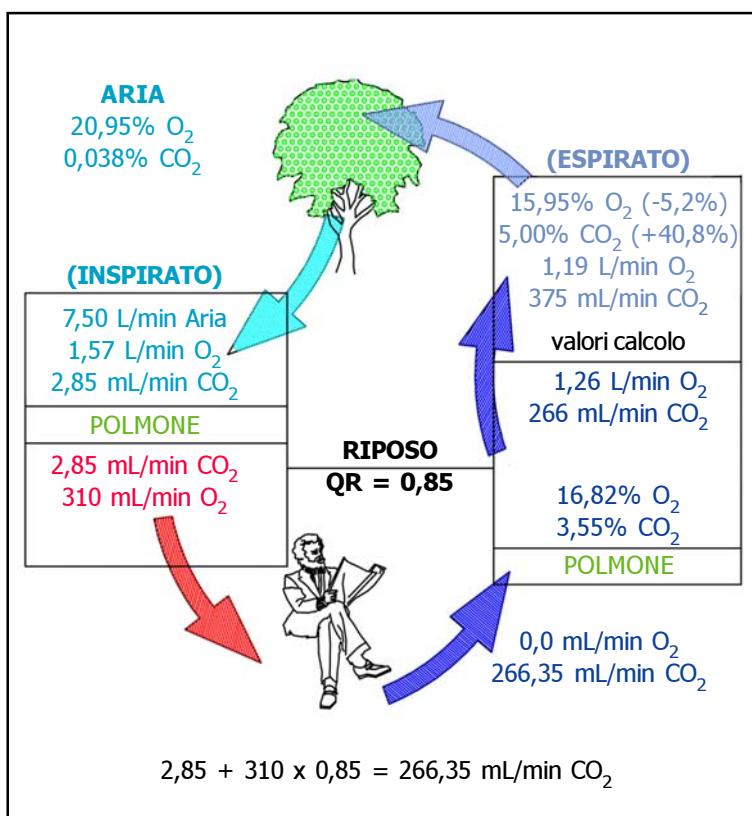
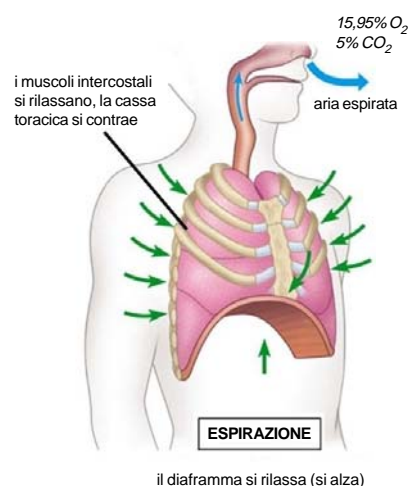


Figura 1. Ciclo della respirazione: valori reali e di calcolo.

Tabella 4. Energia metabolica per tipo di attività secondo UNI 28996.

Classe	Energia metabolica			Esempi	Aumento rispetto energia a riposo	
	Watt/m <sup>2</sup>	Watt	kcal/h			
<b>I</b> Riposo	65	<b>115</b>	<b>98,9</b>	Riposo	0	0%
<b>II</b> Leggera	100	<b>180</b>	<b>154,8</b>	Lavoro leggero (seduto o in piedi), guida auto, passeggiare (3.5 Km/h)	65	57%
<b>III</b> Moderata	165	<b>295</b>	<b>253,7</b>	Lavoro sostenuto (martellare), camminare (5.5 Km/h)	180	157%
<b>IV</b> Elevata	230	<b>415</b>	<b>356,9</b>	Lavoro intenso (scavare, portare carichi), camminare veloce (7 Km/h)	235	204%
<b>V</b> Molto elevata	290	<b>520</b>	<b>447,2</b>	Attività molto intensa, salire scale, correre (> 7 Km/h)	340	296%
<i>Tabella ripresa da UNI 28996</i>					<i>derivata</i>	

dove  $m$  è il peso dell'individuo in kg e  $H$  è la sua altezza in m. Per  $m=70$  kg  $H=1,7$  m risulta  $A=1,8$  mq.

Il consumo specifico di ossigeno secondo quanto riportato nella norma UNI, per un soggetto che bruci solo glucosio ( $QR=1$ ) risulterebbe 5,88 Wh/Litro di  $O_2$ . Le differenze con i valori da noi determinati per altra via risulta quindi di 1-2% circa.

La condizione ingegneristica da noi scelta è sicuramente cautelativa dal punto di vista del degrado dell'aria: corrisponde ad un coefficiente di sicurezza di almeno il 15-20%. Infatti per ogni litro di ossigeno utilizzato dall'organismo vengono rilasciati in atmosfera 0,8-0,85 litri di  $CO_2$ , parte dell'acqua prende la via renale, parte dell'energia prodotta viene utilizzata dall'organismo nelle reazioni bio-chimiche, nel pompaggio dei liquidi, nel funzionamento del mantice polmonare. In base alla tabella 4, il consumo di base giornaliero risulta  $98,9 \times 24 = 2.374$  kcal/giorno.

### 1.3 - Energia consumata da un organismo umano per produrre lavoro meccanico.

Due note di ricordi liceali per i non colleghi. In un universo newtoniano, tecnicamente il lavoro è il risultato di forza per spostamento o  $L = F \times s$ . L'unità di misura del lavoro è il Joule o J o Newton x metro o Nm. Altra unità di misura del lavoro è il kWh, corrispondente a 3.600.000 Joule. La potenza è la quantità di lavoro eseguita nell'unità di tempo ovvero l/s o Watt. Prima del MKSA si usava il  $kg_{peso} \times m$  o  $kgm$  o kilogrammetro. Un kilogrammetro corrisponde a 9,81 J. Ingegneristicamente si possono moltiplicare i valori in  $kgm$  per 10 al fine di ottenere rapidamente i Joule ed i Watt: 1  $kgm=10$  J, 1  $kgm/s=10$  W. Tutto ciò che è in grado di svolgere un lavoro è una forma di energia e si misura in Joule o kcal. L'energia di 860 kcal corrisponde ad un kWh.

**1.3.1. Che potenza può sviluppare un uomo?** Secondo il Manuale dell'Ingegnere (VII-59 edizione 80-1982), 8  $kgm/s$  per parecchie ore, 12-20  $kgm/s$  con intervalli, 25-35  $kgm/s$  per pochi secondi. Essendo 1  $kgm = 9,81$  J, si ottengono le energie riassunte nella tabella 5.

Tipo di attività	kgm/s	W	kWh	kcal/h
Continua per molte ore (7-9, medio 8)	8	78,48	0,08	67,49
Con intervalli di riposo per molte ore (12-20, medio 16)	16	156,96	0,16	134,99
Massimo (25-35), per pochi secondi	35	343,35	0,34	295,28
		<i>potenza</i>	<i>lavoro in 1 h</i>	

Tabella 5. Potenze erogabili da un uomo secondo il Manuale dell'Ingegnere ed. 80.

In un turno di 8 ore, una persona produrrà nel mondo esterno un lavoro meccanico compreso mediamente tra 544 kcal e 810 kcal, ovvero compreso fra 0,63 kWh e 0,95 kWh.

Le UNI 28996 ritengono le pause così determinate:  $Durata_{pausa} < 5.6$   $Durata_{attività}$  0.5. Tale formula si riferisce evidentemente a turno di lavoro di 8 ore: ad 8 ore di attività corrispondono 16 ore di pausa.

L'intervallo di riposo da noi considerato per 150 W prevede 15 minuti di riposo e 45 minuti di lavoro ogni ora. Il calcio, che è un'attività agonistica, prevede questa tempistica di riposo.

L'attività lavorativa manuale nella professioni intellettuali non è ormai un elemento di paragone. Per associare i numeri alle nostre sensazioni e renderci conto dell'effettivo ordine di grandezza, ci rapportiamo a qualcosa di maggiormente noto.

In palestra, il sollevamento di 50 kg per un metro per 1.000 volte in un ora corrisponde, come potenza, a  $50 \times 1 \times 1.000 = 50.000$   $kgm$  in 3.600 secondi da cui  $50.000/3.600 = 13,88$   $kgm/s$  o 136,5 W o 117,4 kcal/h.

Nel lavoro, essendo 25 kg un limite consigliato per la movimentazione manuale (D.Lgs 81/08), si ha che difficilmente oggi si raggiungeranno i 136 Watt di potenza durante un'attività lavorativa. Sollevando un blocco Poroton Thermo 2010 (P700 35x30x22,5) da 21,7 kg di 94 cm ogni 4 secondi (900 blocchi/h, 19,35 tonnellate/h), attività da fare di buona lena, sviluppo una potenza pari a  $20,4$   $kgm/4s = 5,1$   $kgm/s$  circa 50 W. In un'ora movimento  $900/36 = 25$  pallet o 62 mq circa di muratura da 35.

Non vi abbiamo probabilmente fatto caso, ma già tenere accesa una lampada ad incandescenza da 60 W potrebbe per noi essere impegnativo.

Per sapere che cosa succeda esattamente durante un'attività fisica, oggi vi sono apparecchi detti metabolimetri, usati in medicina, che sono ormai in grado di

analizzare ciò che succede, respiro per respiro. Un esempio dei parametri monitorati da tali macchine è riportato in tabella 6. Il fatto che il soggetto analizzato sia arrivato a erogare 250 W con un consumo specifico di circa 14-15 mL di ossigeno per Watt per minuto ci fa ritenere che sia il caso di una persona non debilitata.

Analizziamo quanto riportato nella tabella 6 per un lavoro meccanico da 50Wh. Sviluppando una potenza di 50 Watt, come nel caso di un lavoro manuale non leggero ma eseguibile ininterrottamente per molte ore, sono stati compiuti circa 19,2 atti respiratori al minuto da 1,42 litri/atto corrispondenti a 19,2 atti/min x 1,42 litri/atto = 27,26 litri di aria al minuto (1,22 moli/min). Nei 27,26 litri di aria è contenuto il 20,95% di ossigeno (5,71 litri O<sub>2</sub>/min, 0,25 moli/min). Da questi 5,71 litri di ossigeno al minuto disponibili l'organismo estrae circa il 20-21%, ovvero 5,71 x 20,7% = 1,18 litri/minuto (0,055 moli/min).

Per un lavoro da 150 Wh i litri di ossigeno assorbiti sono quindi 52,46 x 0,2095 x 20,2% = 2,22 litri O<sub>2</sub>/minuto. Da qui si evidenzia che la percentuale di estrazione dell'ossigeno dall'inspirato non varia significativamente col variare della dinamica respiratoria.

**1.3.2. Analisi energetica.** L'UNI per il calcolo dell'energia metabolica utilizza la formula  $E=(0,23 QR + 0,77) \times 5,88 \text{ Wh/litroO}_2$ , dove QR è il quoziente respiratorio e viene suggerito pari a 0,85. Il calcolo dell'energia metabolica secondo UNI 28996 per una persona con QR=1, corrispondente alla situazione ingegneristica da noi scelta, risulta 5,88 Wh/litroO<sub>2</sub> contro i 5,8 Wh/litroO<sub>2</sub> da noi calcolato. Con QR=0,85, quello usato nella norma, risulta E=5,67 Wh/litroO<sub>2</sub>.

Tabella 6. (da F. Sardella, Istituto di Scienza dello Sport del CONI).

<b>potenza (Watt)</b>	<b>riposo</b>	<b>50</b>	<b>100</b>	<b>150</b>	<b>200</b>	<b>250</b>
VO <sub>2</sub> (Litri*min <sup>-1</sup> )	0,30	1,18	1,69	2,22	2,92	3,64
V <sub>E</sub> (Litri*min <sup>-1</sup> )	6,80	26,60	38,60	51,40	76,70	103,90
V <sub>T</sub> (Litri)	0,45	1,42	1,82	2,09	2,42	2,65
FR (respiri*min <sup>-1</sup> )	15,00	19,20	21,80	25,10	32,20	40,10
V <sub>I</sub> (Litri*min <sup>-1</sup> )	6,75	27,26	39,68	52,46	77,92	106,27
V <sub>I</sub> (Litri*h <sup>-1</sup> )	405,00	1.635,84	2.380,56	3.147,54	4.675,44	6.375,90
V <sub>E</sub> /V <sub>I</sub>	1,0	0,98	0,97	0,98	0,98	0,98
	<b>riposo</b>	<b>50</b>	<b>100</b>	<b>150</b>	<b>200</b>	<b>250</b>

VO<sub>2</sub> = volume di ossigeno consumato dall'organismo, in litri al minuto

V<sub>E</sub> = volume totale di aria espirato, in litri/minuto

V<sub>T</sub> = volume di aria inspirato per atto respiratorio, in litri

FR = frequenza respiratoria, in numero di respiri al minuto

V<sub>I</sub> = volume di aria inspirato V<sub>I</sub> = FR x V<sub>T</sub> in litri/minuto e litri/ora

V<sub>E</sub>/V<sub>I</sub> = rapporto fra il volume di aria espirato ed inspirata

<b>potenza (Watt)</b>	<b>riposo</b>	<b>50</b>	<b>100</b>	<b>150</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	
1 VO <sub>2</sub> /Watt (mLO <sub>2</sub> /W min)		23,6	16,9	14,8	14,6	14,56	specifico
2 Slope mLO <sub>2</sub> /W min		17,6	10,2	10,6	14,0	14,4	pendenza
3 Energia metabolica per litro O <sub>2</sub> kcal/ LitroO <sub>2</sub>	4,99	4,99	4,99	4,99	4,99	4,99	produzione kcal/h
4 Energia metabolica per litro O <sub>2</sub> Wh/ LitroO <sub>2</sub>	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	produzione Wh
5 Energia metabolica solo glucosio Watt	104,45	410,84	588,40	772,93	1.016,65	1.267,33	valori da calcolo
6 Energia metabolica QR=0,85 UNI 28996 - Watt	102,19	401,94	575,66	756,20	994,63	1.239,89	consigliati UNI
7 Energia metabolica QR=1 UNI 28996 - Watt	105,84	416,30	596,23	783,22	1.030,18	1.284,19	energia
8 Differenza fra 5 e 7 in %	-1,31%	-1,31%	-1,31%	-1,31%	-1,31%	-1,31%	differenza
<b>Classe UNI 28996</b>	<b>I</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>	<b>V</b>	<b>V</b>	<b>V</b>	

Non vi è grande differenza, meno del 2% circa, fra quanto valutato col nostro metodo e con quello UNI. Ciò significa che la nostra base di ragionamento può considerarsi comune a tutti gli effetti. I nostri valori sono lievemente maggiori di quelli consigliati dall'UNI poiché l'UNI utilizza il quoziente respiratorio QR=0,85.

Tabella 7. Analisi energetica, comparazione con valori UNI. Sotto: Tabella 8. Variazioni di volume fra aria inspirata ed espirata a 50 W

		<b>inspirato</b>	<b>espirato</b>	<b>differenza</b>	<b>%</b>	<b>note</b>	
1	Aria	Litri/minuto	27,26	26,60	-0,66	-2,44	Aria: 78% N <sub>2</sub> , 21% O <sub>2</sub> , 0,035% CO <sub>2</sub>
2	Ossigeno (20,95%)	Litri/minuto	5,71	4,53	1,18	20,66	differenza=ossigeno consumato
3	CO <sub>2</sub> 380 ppm	Litri/minuto	0,010	1,008	0,993	9.581,00	stimato con QR=0,85 (1,008/1,18)
A	B	C	D	E	F	G	H

**1.3.3. Calcolo dell'energia utilizzata.** Abbiamo visto che per unità di ossigeno consumato dall'organismo la maggior produzione di energia, CO<sub>2</sub> e calore avviene con la combustione del glucosio. Considerando quindi un individuo che bruci solo glucosio, rientriamo nelle condizioni che gli ingegneri definiscono a favore di sicurezza: potrà essere sicuramente meglio e non peggio. Nelle tabelle 9, 10 e 11 sono riportati i consumi relativi.

Tabella 9. Potenza erogata pari a 0 W (riposo)

Caratteristiche degli elementi energetici							
		consumo l/h	moli /ora	grammi /ora	Kcal/h	Watt	note
1	Aria	405,00	18,07	523,64			
2	Ossigeno	18,00	0,8	25,7			comburente
<i>Quantità caratteristiche in riferimento alla combustione basata sulla quantità d'ossigeno</i>							
3	Glucosio		0,13	24,09	89,73	104,34	combustibile
4	CO <sub>2</sub>		0,8	35,34			prodotto
5	H <sub>2</sub> O		0,8	14,46			prodotto
a	b	c	d	e	f	g	h

Tabella 10. Potenza erogata pari a 50 W

Caratteristiche degli elementi energetici								
		consumo l/h	moli /ora	grammi /ora	Kcal/h	Watt	g/h per Watt utile	note
1	Aria	1.635,84	72,98	2.115,05				
2	Ossigeno	70,8	3,16	101,08			2,02	comburente
<i>Quantità caratteristiche in riferimento alla combustione basata sulla quantità d'ossigeno</i>								
3	Glucosio		0,53	94,76	352,94	410,39	1,90	combustibile
4	CO <sub>2</sub>		3,16	138,98			2,78	prodotto
5	H <sub>2</sub> O		3,16	56,86			1,14	prodotto
6	Efficienza 50/g3					12,18%		
a	b	c	d	e	f	g	h	i

La resa energetica netta è pari a circa il 12,2%, dato da  $(50 / 410,39 = 12,2\%)$ .

Tabella 11. Potenza erogata pari a 200 W

Caratteristiche degli elementi energetici								
		consumo l/h	moli /ora	grammi /ora	Kcal/h	Watt	g/h per Watt utile	note
1	Aria	4.675,44						
2	Ossigeno	175,2	7,82	250,13			1,25	comburente
<i>Quantità caratteristiche in riferimento alla combustione basata sulla quantità d'ossigeno</i>								
3	Glucosio		1,3	234,5	873,37	1.015,54	1,17	combustibile
4	CO <sub>2</sub>		7,82	343,93			1,72	prodotto
5	H <sub>2</sub> O		7,82	140,7			0,7	prodotto
6	Efficienza 200/g3					19,69%		
a	b	c	d	e	f	g	h	i

La resa energetica a 200 W è pari a circa il 20%, migliore quindi del 12,2% ottenuto a 50 W. Questo comporta che le deduzioni ed i ragionamenti effettuati sulla potenza di 50 W mantengono la loro validità al crescere della potenza meccanica erogata.

Se dovessi sviluppare 1 kW, 5 volte tale potenza, avrei una emissione di CO<sub>2</sub> pari a  $343,93 \times 5 = 1.693$  g. Meglio l'automobile (a 120 g/km devo percorrere circa 14 km per produrre 1.693 g, ma non con 1 kW...).

Nella figura 2 è riportato il grafico con valori derivati dalla tabella 6, quale esempio di curva di rendimento umana in funzione della potenza. Si nota che il consumo specifico

di ossigeno del soggetto analizzato per potenze superiori a 100 W è compreso fra 14 e 15 mL di ossigeno per minuto per Watt, in accordo con i valori di letteratura 10-16 mL O<sub>2</sub> per minuto per Watt. Il consumo comprende anche l'energia di base del corpo.

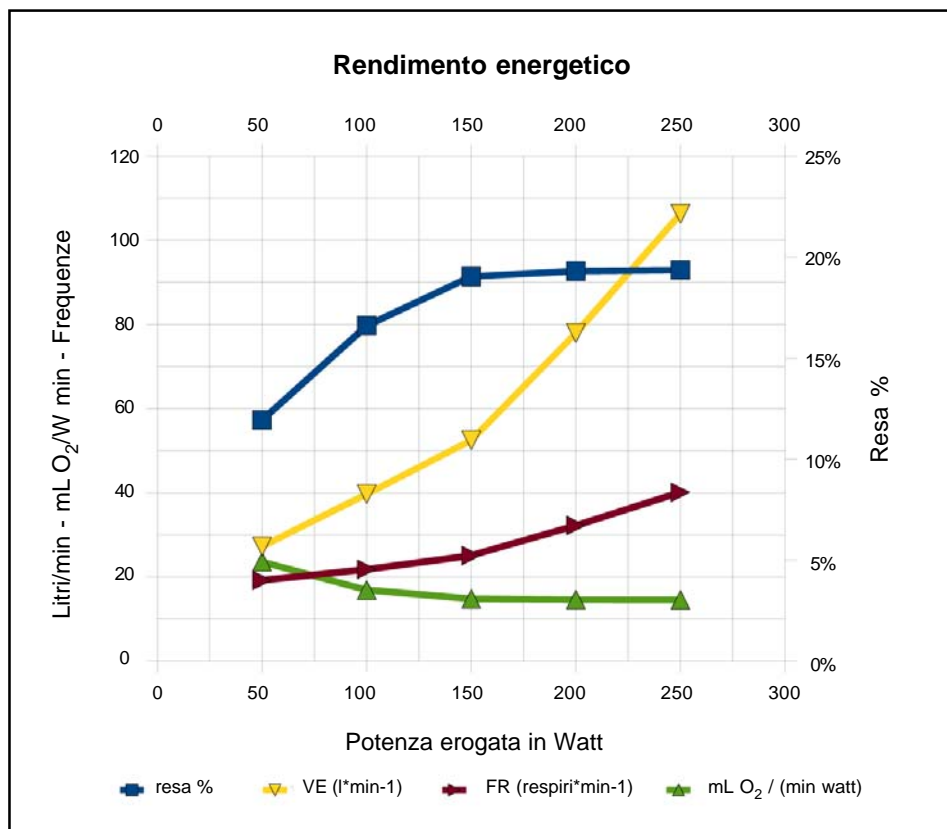


Figura 2. Caratteristiche fisiologiche di un organismo umano a diverse potenze.

## II. APPLICAZIONE AI RICAMBI D'ARIA

### II.1 - Valori limite richiesti all'aria per essere salubre.

I valori di accettabilità dei gas nel respirato sono di origine USA e sono praticamente utilizzati in tutto il mondo. I limiti dei contenuti dei gas interessati dalla respirazione risultano come da valori standard di letteratura e sono riassunti nelle tabelle 12 e 13.

Tabella 12. Valori di soglia per il biossido di carbonio.

CAS: 124-38-9 carbon dioxide - biossido di carbonio (anidride carbonica)						
OSHA		NIOSH		ACGIH		UM
PEL TWA	5.000	REL-TWA	5.000	TLV-TWA	5.000	ppm
PEL TWA	9.000			TLV-TWA	9.000	mg/mc
		REL-STEL	30.000	TLV-STEL	30.000	ppm
				TLV-STEL	54.000	mg/mc
OSHA - Occupational Safety & Health Administration		NIOSH - National Institute for Occupational Safety and Health		ACGIH - American Conference of Governmental Industrial Hygienists		
PEL - Permissible Exposure Limit; TWA-Limite di esposizione medio pesato consentito in 8 ore lavorative distribuite in 40 ore settimanali		REL - Recommended Exposure Limits, TWA - Limiti di esposizione raccomandati medi pesati consentiti in 8 ore lavorative senza rischi residui, REL-STEL su 15 minuti		TLV Treshold Limit Values TWA Valore di soglia limite medio pesato su 8 ore/giorno o 40 ore settimana TLV-STEL su 15 minuti (Short Term Exposure Limit)		
OSHA Chemical Sampling Information - Carbon dioxide: General Industry PEL, Construction Industry PEL - CH 225400		CDC-6603				

Ricordiamo che nei magazzini in questione - dato il tipo di merce e posto che i mezzi dediti alla movimentazione sono esclusivamente elettrici - non risultano pre-

senti altre sorgenti di gas inquinanti oltre alle persone, quali ad esempio motori a combustione, fumi, vapori, polveri o le merci stesse.

CAS: 7782-44-7 oxygen-ossigeno						
OSHA		NIOSH		ACGIH		UM
contenuto minimo	19,50%	contenuto minimo al livello del mare	19,50%	contenuto minimo > pressione >	18,00% 135	% Torr
OSHA - Occupational Safety & Health Administration		NIOSH - National Institute for Occupational Safety and Health		ACGIH - American Conference of Governmental Industrial Hygienists		
(OSHA 29CFR1910.134, Oxygen deficient atmosphere)		NIOSH Publication No. 87-113				

Tabella 13. Valori minimi per l'ossigeno.

## II.2 - Valutazione dei ricambi d'aria.

Per non farla troppo complicata, diamo vita ad un situazione immaginaria. Costruiamo un locale confinato e sigillato, privo di comunicazioni con l'esterno, con volume di 25.000 mc, ovvero pari al ricambio d'aria orario richiesto dalla norma. All'interno lavorano 10 persone, condizione a favore di sicurezza in quanto le persone non dormono in genere nei magazzini, almeno quelli con lavoratori italiani... Se non vi piace il locale, pensate ad un sottomarino in avaria sul fondo del mare.

L'aria ha condizioni iniziali  $T = 20^{\circ}\text{C}$ , UR 45%.

Le 10 persone svolgono un lavoro da 50 W su turni di 8 ore al giorno. Non vi sono nell'ambiente utilizzatori di  $\text{O}_2$ , sorgenti di conversione dell'ossigeno in  $\text{CO}_2$ , sorgenti di calore o di inquinanti diverse dalle 10 persone: queste ultime sono quindi le uniche responsabili delle variazioni dell'aria nel locale. La riserva d'aria disponibile risulta pari a 25.000 mc, corrispondente quindi al prescritto volume d'aria da ricambiare ogni ora nel nostro magazzino.

	numero	ore	consumo unitario aria litri/h	consumo unitario $\text{O}_2$ litri/h	mc aria giorno	mc ossigeno giorno	moli ossigeno giorno	grammi ossigeno giorno
<b>lavoranti</b>	10	8	1.635,84	70,8	130,87	5,66	252,7	8.086
<b>riposanti</b>	10	16	405,00	18	64,8	2,88	128,5	4.112
<b>medio</b>			815,28	35,6				
<b>totale</b>					195,67	8,54	381,2	12.198

Tabella 14. Calcolo del fabbisogno reale di ossigeno delle 10 persone.

Nei calcoli di verifica:

40,76  $\text{LO}_2/\text{h}$  (+15% di 35,6)

436,44 moli  $\text{O}_2/\text{giorno}$  invece di 381,2

40,76  $\text{LCO}_2/\text{h}$  (+40% di 28,54).

Valutiamo innanzitutto le conseguenze legate alla presenza delle 10 persone. Perché la concentrazione di un gas in un ambiente stagno di volume  $V_{\text{TOT}}$  in cui avviene una trasformazione producendo volumi di gas con concentrazione  $C_{\text{TRA}}$  passi dal valore inizialmente presente  $C_{\text{INI}}$  a quello limite  $C_{\text{LIM}}$  deve essere trasformato il volume  $V_{\text{TRA}}$  soddisfacente l'equazione:

$$(V_{\text{TOT}} - V_{\text{TRA}}) \times C_{\text{INI}} + V_{\text{TRA}} \times C_{\text{TRA}} = V_{\text{TOT}} \times C_{\text{LIM}}$$

Esempio didattico: ho un recipiente stagno contenente un volume di 100 mc ( $V_{\text{TOT}}$ ) di aria al 20% ( $C_{\text{INI}}$ ) di ossigeno. La concentrazione limite di ossigeno ( $C_{\text{LIM}}$ ) cui posso arrivare è il 15%. In questo recipiente da 100 mc qualcuno usa l'aria inizialmente al 20% ( $C_{\text{INI}}$ ) di ossigeno e restituisce aria al 10% ( $C_{\text{TRA}}$ ) di ossigeno.  $(100 - Y) \times 20\% + Y \times 10\% = 100 \times 15\%$  da cui  $-Y \times 10\% = 15 - 20 = -5$  mc

Dopo aver utilizzato 50 mc di aria, avrò  $C_{\text{LIM}} = (50 \times 20\% + 50 \times 10\%) / 100 = 15\%$ .

**II.2.1. Dal punto di vista della qualità dell'aria.** Tramite la formula precedente deduciamo il tempo necessario perché si verifichi il raggiungimento dei limiti ammessi dalla qualità dell'aria: le 10 persone impiegano ben 37 ( $C_{\text{TRA}} = 15,95\%$ ) giorni per portare il contenuto d'ossigeno sotto soglia e quasi 12 giorni ( $C_{\text{TRA}} = 5\%$ ) per superare il valore medio ammesso di biossido di carbonio.

Il degrado maggiore è provocato dall'immissione di biossido di carbonio. Si

ricorda che il tempo di raggiungimento dei valori di soglia per il biossido di carbonio è stato ottenuto con un  $C_{TRA}$  superiore del 40%. Inoltre le persone non riposano nell'ambiente di lavoro. L'ossigeno e l'anidride carbonica sono motivi immediati e senza alternativa del ricambio d'aria: una loro quantità non corretta è avvertita e produce importanti effetti sull'organismo nel brevissimo termine. Nel caso in esame la prima soglia viene raggiunta in circa 12 giorni di 24 ore. La norma prevede un ricambio d'aria primaria di valore lievemente differente, solo 280 volte superiore.

**II.2.2. Dal punto di vista termico.** La tabella 15 contiene gli elementi per la valutazione della componente termo-igrometrica. La componente termica, per semplicità e chiarezza, sarà trattata separatamente da quella igrometrica.

elementi	numero persone	ore	Produzione unitaria kcal/h	Produzione unitaria H <sub>2</sub> O grammi/h	calore giorno kcal	calore giorno kWh	acqua giorno litri
lavoranti 50 W	10	8	352,94	56,86	28.234,92	32,83	4,55
riposanti 0 W	10	16	89,73	14,46	14.356,74	16,69	2,31
valore medio			177,47	28,59			
<b>totale</b>					<b>42.591,67</b>	<b>49,53</b>	<b>6,86</b>
energia meccanica da sottrarre (50W)	10	8			3.440,00	4,00	
calore netto					39.151,67	45,53	

La temperatura dell'aria presente inizialmente nel locale è 20°C. Il calore specifico dell'aria vale  $C_p=240,2$  cal/kg/°C; la densità dell'aria secca vale 1,204 kg/mc da cui  $C_p= 0,2892$  Kcal/mc/°C. La formula adoperata è quella primordiale:  $48.768=0,2892 \times 25.000 \times DT$ .

Nel locale considerato adiabatico le 10 persone impiegano circa 21 ore per elevare la temperatura del volume presente a 26 °C. L'aumento assoluto risulta pari a 6,8 °C. Secondo la norma tale volume andrebbe ricambiato ogni ora.

Ordinariamente il problema non sussiste in quanto, come le nostre tasche ben sanno, gli involucri edilizi disperdono energia. In particolare d'inverno si può ipotizzare - per assurdo ma a favore di sicurezza - la sola dispersione media dal tetto, pari a 0,38 W/mq (manca per ogni grado...). In zona C la dispersione limite al 2010 risulta 0,38 W/mq°K.

A tale dispersione corrispondono su 5.000 mq 1,9 kW. In 24 ore corrisponde ad un'energia di 45,6 kWh. Il locale sigillato con una dispersione di 45,6 kWh giorno - roba da tripla A - non vedrebbe aumentare significativamente la temperatura per diversi giorni.

**II.2.3. Dal punto di vista igrometrico.** Nel locale sigillato l'aria presente inizialmente ha  $T=20^\circ\text{C}$  e 45% UR. Sono accettate temperature fino a 26°C e UR 60%, valori ammessi per il condizionamento estivo.

Nelle ipotesi di calcolo fatte, un lavoratore che eroga una potenza di 50 W (un lavoro medio pesante) produce anche 65,7 g di acqua all'ora. A riposo produce circa 16,3 g di acqua all'ora.

Un mc di aria secca a 20°C pesa 1,204 kg e può contenere 14,67 g/kg  $\times 1,204 = 17,66$  g/mc di vapore a saturazione (100%UR). Al 45% di UR contiene quindi  $17,66 \times 0,45 = 7,85$  g/mc.

Per semplicità, a favore di sicurezza, supponiamo che aumenti solo il contenuto di vapore e non la temperatura.

Le 10 persone immettono 7.856 grammi di acqua in 25.000 mc per cui aumentano di 0,31 g/mc il contenuto medio di acqua. L'aria nel locale passa da 7,85 a 8,16 g/mc in un giorno. A 20 °C 8,16 g/mc corrispondono a meno del 50% di UR, come da tabella 16.

Mettiamo ora in conto una ulteriore spaventosa sudorazione, nell'ordine di 5 litri/giorno per persona, valore a favore di sicurezza, e non teniamo conto dell'aumento di temperatura. Otteniamo che a 20 °C il contenuto di vapore passerebbe da 8,16 g/mc a  $8,16 + 50.000/25.000 = 10,16$  g/mc. L'UR a 20 °C dopo un giorno sarebbe inferiore al 60%, ovvero ancora accettabile.

**Tabella 15. Produzione reale di energia ed acqua da parte delle persone presenti nel locale sigillato.**

Nei calcoli di verifica saranno adoperati:  
**48.768 kcal/giorno (+14.5% di 42.592)**  
**7,86 L/giorno (+14.5% di 6,86).**

UR	Titolo x	Entalpia h	v	vapore
[%]	gr/kg	kJ/kg	mc/kg	g/mc
15%	2,16	25,54	0,83	2,60
40%	5,79	34,71	0,84	6,97
<b>45%</b>	<b>6,52</b>	<b>36,56</b>	<b>0,84</b>	<b>7,85</b>
<b>50%</b>	<b>7,25</b>	<b>38,41</b>	<b>0,84</b>	<b>8,73</b>
<b>60%</b>	<b>8,72</b>	<b>42,13</b>	<b>0,84</b>	<b>10,50</b>
65%	9,46	44,00	0,84	11,39
100%	14,67	57,18	0,85	17,66

**Tabella 16. Elementi caratteristici dell'aria umida con temperatura al bulbo secco TBS = 20 °C**

La considerazione tecnica e soprattutto economica da farsi è che per ovviare al problema termo-igrometrico è sufficiente condizionare l'aria ambiente, fatto che non richiede assolutamente il ricambio dell'aria, ma la sola asportazione o fornitura del calore e del vapore. In genere i concetti alla base dell'*usa e getta* non sono particolarmente economici e difatti non li troviamo applicati nella parte termica del nostro frigorifero. È e deve tornare ad essere una scelta tecnica di convenienza utilizzare il free cooling...

**II.2.4. Dal punto di vista batteriologico.** Il caso contempla le modifiche introdotte dalla respirazione all'igiene dell'ambiente. Supponiamo che gli addetti emettano ad ogni respiro un volume d'aria con una concentrazione pari al doppio di quella  $C_{LIM}$  ammessa di agenti patogeni. Ciò corrisponde al fatto che i lavoratori ammalati si rechino al lavoro e che si mettano a lavorare di buona lena come se fossero sani. Le dieci persone, come riportato in tabella 14, utilizzano 196 mc/giorno di aria. Da  $(2 \times C_{LIM} \times V_{TRA} / 25000) = C_{LIM}$  si ricava che servono 63 giorni per portare l'ambiente a  $C_{LIM}$ .

### II.3 - Determinazione del ricambio in funzione del volume ambiente.

La legge 81/08 richiede una dotazione minima di 10 mc a persona. Valutiamo ora la quantità d'aria da fornire per mantenerla entro i limiti ammessi. Non analizzeremo la parte termica ed igrometrica, in quanto si è visto essere solo un problema di macchinari di climatizzazione e non di ricambi d'aria. Quello che le macchine non possono fare è produrre ossigeno a costi minori di quello disponibile nell'aria esterna, il problema è l'accumulo in ambiente del biossido di carbonio.

classe		energia metabolica	esempi	Ricambi minimi persona/h	
		Watt		esempi	mc/h persona
I	riposo	115	riposo	riposo conversazione studio lettura	15
II	leggera	180	lavoro leggero, seduto o in piedi: guida auto, passeggiare (3.5 Km/h)	lavori di precisione	15
III	moderata	295	lavoro sostenuto: martellare, camminare (5.5 Km/h)	attività leggera	25
IV	elevata	415	lavoro intenso: scavare, portare carichi, camminare veloce (7 Km/h)	attività media 50 W; Ee = 402 W	30
V	molto elevata	520	attività molto intensa: salire scale, correre (> 7 Km/h)	attività pesante >100 W; Ee =576 W	40
Tabella ripresa da UNI 28996				Tabella ripresa da UNI 8852	

Tabella 17. Sinottico delle parti comuni fra UNI 28996 ed UNI 8852.

La presenza di una persona che produce 50 W comporta l'utilizzo di 1,65 mc/h di aria, l'assorbimento di 81,8 L/h di ossigeno e la produzione, in base alla nostra semplificazione di altrettanto biossido di carbonio. Erogare la potenza di 50 W, attività elevata, sviluppa come da tabella 7 oltre 400 W di energia metabolica, per cui ricade nel tipo IV della tabella 17, in cui sono state allineate coerentemente le dichiarazioni di due norme UNI. Dalla tabella si deduce che è richiesto un ricambio minimo di 30 mc/h persona.

Analizziamo quindi le vicende di una persona che svolga un'attività lavorativa da 50 W in un ambiente da 10 mc cui venga fornito un ricambio d'aria pari a 30 mc/h. Se non ricambiassi l'aria,

- in poco più di mezz'ora raggiungerei la concentrazione di 5000 ppm di CO<sub>2</sub>;
- in meno di due ore l'ossigeno dell'aria si ridurrebbe a 19500 ppm.

La soluzione generale analitica del problema è la seguente. L'incognita è la concentrazione di biossido di carbonio CO<sub>2</sub>(t) nel tempo all'interno del volume V [mc]. Effettuo un ricambio d'aria Q<sub>ric</sub> con concentrazione di CO<sub>2</sub> pari a quella dell'aria esterna (380 ppm) ed una estrazione di pari portata con concentrazione CO<sub>2</sub>(t). Per via della respirazione prelevo dal volume V una portata Q<sub>resp</sub> con concentrazione CO<sub>2</sub>(t) ed immetto una portata Q<sub>resp</sub> con concentrazione di 50.000 ppm oltre il valore CO<sub>2</sub>(t).

#### Ingressi nel volume V:

- Portata d'aria di espirazione Q<sub>resp</sub> [mc/h] con concentrazione nell'espirato di 50.000

ppm di CO<sub>2</sub> superiore a quella inspirata. La condizione è cautelativa.

- Portata d'aria di ricambio  $Q_{ric}$  [mc/h] con concentrazione 380 ppm di CO<sub>2</sub>.

#### Uscite dal volume V:

- Portata d'aria di inspirazione  $Q_{resp}$  [mc/h] con concentrazione pari a CO<sub>2</sub>(t) [ppm]
- Portata d'aria di estrazione  $Q_{ric}$  [mc/h] con concentrazione pari a CO<sub>2</sub>(t) [ppm]

Applicando l'equazione di continuità ottengo:

#### Biossido di Carbonio

$$\frac{dCO_2(t)}{dt} = \frac{(Q_{ric} \cdot 380 - Q_{ric} \cdot CO_2(t) + Q_{resp} \cdot 50.000)}{V}$$

$$\frac{dCO_2(t)}{dt} + \frac{Q_{ric}}{V} \cdot CO_2(t) - \frac{(Q_{ric} \cdot 380 + Q_{resp} \cdot 50.000)}{V} = 0$$

la cui soluzione è

$$CO_2(t) = [CO_2(0) - \frac{(Q_{ric} \cdot 380 + Q_{resp} \cdot 50.000)}{Q_{ric}}] \cdot e^{-\frac{Q_{ric}}{V} \cdot t} + \frac{(Q_{ric} \cdot 380 + Q_{resp} \cdot 50.000)}{Q_{ric}}$$

ed essendo normalmente CO<sub>2</sub>(0) = 380, il tutto si riduce a:

$$CO_2(t) = 380 + [\frac{Q_{resp} \cdot 50.000}{Q_{ric}}] \cdot (1 - e^{-\frac{Q_{ric}}{V} \cdot t})$$

Il ragionamento per l'ossigeno è identico, ci sono solo cambio di coefficienti e di un segno.

#### Ossigeno

$$\frac{dO_2(t)}{dt} = \frac{(Q_{ric} \cdot 209500 - Q_{ric} \cdot O_2(t) - Q_{resp} \cdot 50.000)}{V}$$

$$\frac{dO_2(t)}{dt} + \frac{Q_{ric}}{V} \cdot O_2(t) - \frac{(Q_{ric} \cdot 209500 - Q_{resp} \cdot 50.000)}{V} = 0$$

la cui soluzione è

$$O_2(t) = [O_2(0) - \frac{(Q_{ric} \cdot 209500 - Q_{resp} \cdot 50.000)}{Q_{ric}}] \cdot e^{-\frac{Q_{ric}}{V} \cdot t} + \frac{(Q_{ric} \cdot 209500 - Q_{resp} \cdot 50.000)}{Q_{ric}}$$

ed essendo normalmente O<sub>2</sub>(0) = 209500, il tutto si riduce a:

$$O_2(t) = 209500 - [\frac{Q_{resp} \cdot 50.000}{Q_{ric}}] \cdot (1 - e^{-\frac{Q_{ric}}{V} \cdot t})$$

La soluzione evidenzia che le concentrazioni al tempo infinito non dipendono dal volume ambiente ma dal rapporto fra le portate di respirazione e di ricambio. Il volume ambiente risulta comunque importante perché ritarda nel tempo il raggiungimento di tale concentrazione.

Supponiamo che al tempo 0 la concentrazione di CO<sub>2</sub> sia pari a 380 ppm. Il valore limite PEL/REL/TLV di 5.000 ppm è un valore medio pesato nel tempo (TWA, *Time Weighted Average*), noi lo considereremo come assoluto a favore di sicurezza. Con ciò si intende sottolineare che il valore limite da non superare è lo STEL (30.000 ppm): il

raggiungimento ed il superamento di 5.000 ppm non rappresenta in genere di per sè una situazione di rischio. Vediamo ora alcuni scenari.

**Scenario 1.**  $Q_{ric} = 30 \text{ mc/h}$ ,  $V = 10 \text{ mc}$   $Q_{res} = 1,65 \text{ mc/h}$ , corrispondente al caso di applicazione della norma UNI, comporta il raggiungimento di  $380 + 1,65 \times 50000 / 30 = 380 + 82500 / 30 = 3130 \text{ ppm}$ , minore di 5.000 ppm, valore limite accettato. Dopo 8 ore, al termine della giornata lavorativa, raggiunge la concentrazione di  $380 + 3130 (1 - e^{-30/10 \times 8}) = 3130 \text{ ppm} < 5.000 \text{ ppm}$ . Dopo un tempo infinito, l'ossigeno risulterebbe:  $209500 - 1,65 \times 50000 / 30 = 206750 \text{ ppm}$ . Dopo 8 ore l'ossigeno sarebbe 207986 ppm, maggiore del limite ammesso di 195000 ppm.

**Scenario 2.**  $Q_{ric} = 30 \text{ mc/h}$ ,  $V = 300 \text{ mc}$   $Q_{res} = 1,65 \text{ mc/h}$ , come nell'esempio 1 ma con volume ambiente maggiore. Si avrà il raggiungimento all'infinito di  $380 + 82.500 / 30 = 94900 / 30 = 3130 \text{ ppm}$ , minore di 5.000 ppm. Dopo 8 ore, al termine della giornata lavorativa, raggiunge la concentrazione di  $380 + 3130 (1 - e^{-30/300 \times 8}) = 1894 \text{ ppm}$ , minore di 5.000 ppm e minore anche di 3130 ppm ottenuto prima.

**Scenario 3.** In alternativa avrei potuto raggiungere un risultato migliore della norma UNI, 3129 ppm, con portate di ricambio minori:  $Q_{ric} = 20 \text{ mc/h}$ ,  $V = 300 \text{ mc}$   $Q_{res} = 1,65 \text{ mc/h}$ , come nell'esempio 2 ma con portata di ricambio minore. La concentrazione al tempo infinito risulta:  $380 + 82500 / 20 = 4505 \text{ ppm}$  minore di 5000 ppm. Dopo 8 ore:  $380 + 4505 (1 - e^{-20/300 \times 8}) = 2085 \text{ ppm}$ , minore di 3130 ppm. Dopo un tempo infinito, l'ossigeno risulterebbe:  $209.500 - 1,65 \times 50.000 / 20 = 205.375 \text{ ppm}$  contro il valore 206.750 relativo ad un ricambio di 30 mc/h. Dopo 8 ore avremmo 207.795 ppm a fronte delle 207.986 ppm ottenute con 30 mc/h di ricambio.

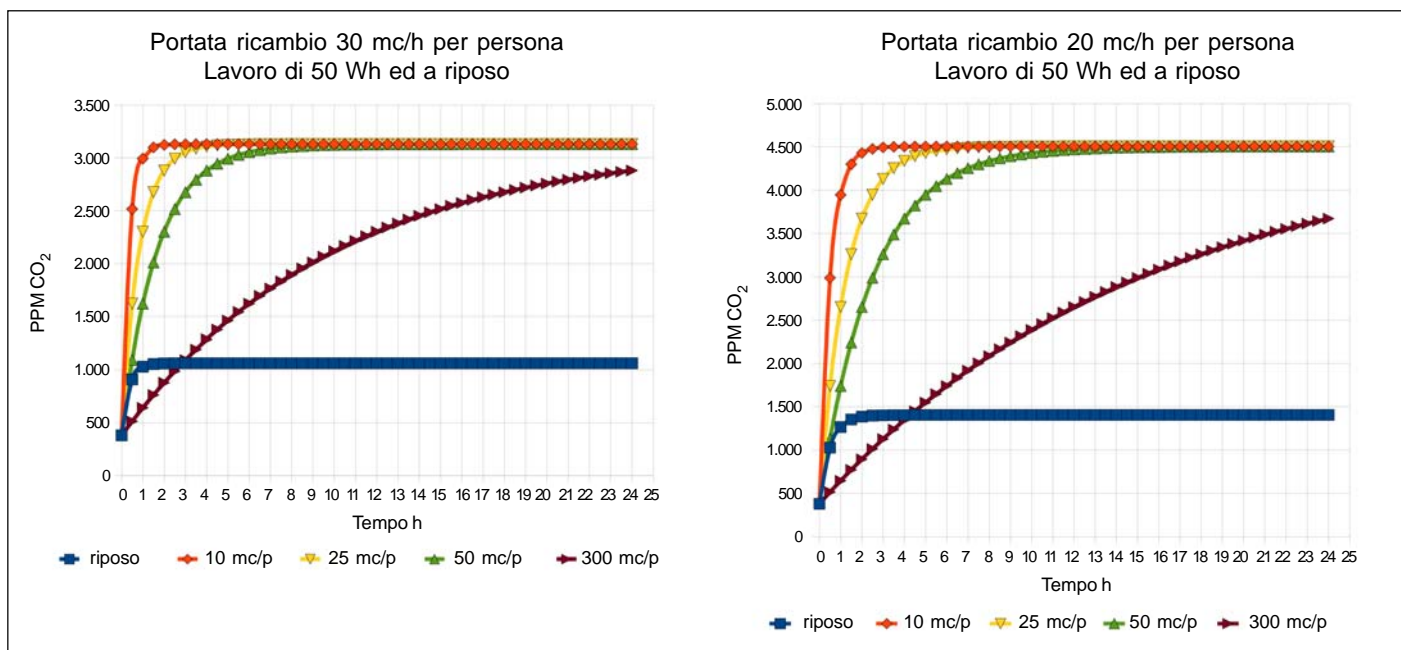


Figura 3. Andamento nel tempo della concentrazione di  $\text{CO}_2$  per vari volumi ambiente.

Nella figura 3, il grafico a sinistra mostra che i valori di  $\text{CO}_2$  sono abbondantemente in norma anche con volumi di 10 mc per persona. I valori del volume ambiente e della portata di ricambio sono riferiti ad una persona p. La concentrazione di  $\text{CO}_2$  relativa al valore a riposo è stato riportato per il solo volume  $V = 10 \text{ mc}$ .

Dal grafico a destra si vede che i valori di  $\text{CO}_2$  sono in norma anche con volumi di 10 mc per persona. Il volume maggiore consente di dilazionare nel tempo il raggiungimento del valore massimo. I valori sono riferiti ad una persona p. Dopo un turno di lavoro di 8 ore con 300 mc/persona a disposizione si superano di poco 2000 ppm anche con i valori maggiorati del 40% adoperati.

### III. DISCUSSIONE.

Come visto dagli esempi il non tener conto del volume a disposizione conduce, all'aumentare del volume disponibile, a volumi d'aria di ricambio non proporzionali ai benefici ottenuti. Se rapportiamo l'incremento dei costi impiantistici da sostenere

per ottenere questi ulteriori benefici deduciamo che è il tutto è sproporzionato. L'utilizzo del valore limite al tempo infinito per il dimensionamento dei ricambi d'aria senza tener conto del periodo transitorio e delle inerzie porta a non poter gestire adeguatamente il risparmio energetico. Ad esempio sfruttando il volume potrei, rimanendo nei limiti prescritti, effettuare un ricambio completo dell'aria quando conviene di più come di notte nel periodo estivo e nelle ore più calde invernali. Oppure potrei utilizzare degli assorbitori di CO<sub>2</sub>, me la caverei con meno di 1 kW per 2 kg di CO<sub>2</sub> l'ora. Rimaniamo in attesa che la ricerca, dopo le lenti a contatto gas permeabili, ci fornisca membrane o dispositivi economici permeabili ai gas che non disperdano il calore per mantenere l'equilibrio dei gas con l'esterno...

I costi di gestione conseguenti alle portate richieste sono legati al fatto di dover trattare l'aria esterna in ingresso ed alle perdite per via dell'energia espulsa. Se è vero che è possibile recuperare parte dell'energia espulsa è anche vero che è opportuno, anche ai fini del risparmio energetico, che tutto l'insieme vada riconsiderato e riportato nei binari della razionalità e del rapporto costi-benefici.

#### IV. CONCLUSIONI.

Abbiamo appurato che il volume è anche salute. Da quanto espresso finora si desume che una immissione di aria esterna pari a circa 11 volte il respirato (18 mc/h a fronte di 1,65 mc/h) per un lavoratore che produca 50 Wh di lavoro meccanico, fin dalla dotazione di volume minima di legge, pari a 10 mc per persona, è sufficiente a garantire la qualità dell'aria relativamente ai parametri Ossigeno e CO<sub>2</sub>, con abbondanti margini di sicurezza.

Le norme richiedono 30 mc/h, circa il 66% in più di 18 mc/h. I valori soglia da noi adottati sono riconosciuti come sicuri ed usati dal mondo intero. I calcoli eseguiti sono espliciti e dimostrano che è plausibile attuare una riduzione importante, a due cifre percentuali, dei volumi di trattamento aria esterna.

Dall'analisi svolta risulta evidente che per il ricambio di aria non si può prescindere dalle dimensioni dell'ambiente e dal tipo di attività svolta. Va tenuto presente che oggi nell'ambiente di lavoro per effetto combinato di vari disposti normativi non si fuma, le macchine non sono a scoppio ma elettriche, la pulizia è migliorata, gli sforzi fisici sono minori, si fanno le analisi di rischio, i percorsi di fuga sono di circa 40 m. L'introduzione delle varie norme ha quindi ridotto le eventuali incognite nel calcolo dei ricambi d'aria in tanti ambienti di lavoro e non.

La non considerazione del volume disponibile per addetto può portare ad un dimensionamento ed a costi energetici ed impiantistici eccessivi: una cabina di ascensore ed un magazzino alto 10 metri non sono la stessa cosa. Il volume d'aria disponibile funziona da ammortizzatore, consentendo di spalmare su più ore la rigenerazione qualitativa totale dell'aria, incluse le ore notturne, riducendo in generale le dimensioni e le potenze delle macchine di trattamento primario e di ricircolo, dei canali di distribuzione e di ripresa. Certamente l'elettronica dedicata porterà dei benefici per i vari soggetti e per l'ambiente, ma non basta. Che senso ha affannarsi a ridurre e contenere le emissioni se poi non rivalutiamo anche i processi a base delle emissioni?

Quanto esposto è servito unicamente per ricondurre oggettivamente in una dimensione tecnico-numerica i fabbisogni di aria primaria di un individuo e dare a tutti la possibilità di effettuare le proprie valutazioni tecniche. Le conclusioni, tecni-



Nelle foto: l'esterno e l'interno del capannone che ha fornito lo spunto per questo studio.



## I costi non considerati del “più sicuro”

*Iter para tutum*, dice un verso di un antico canto liturgico, che, nella versione italiana, suona “fai in modo che il nostro cammino sia sicuro”. Infatti *tutum* è l'accusativo singolare neutro dell'aggettivo *tutus* che significa, appunto, sicuro e che al nominativo singolare maschile comparativo diventa *tutior*.

Allora, per essere sicuri che l'aria all'interno di un certo ambiente si mantenga salubre, occorre fornire, allo stesso ambiente, volumi di ricambio tali che il contenuto di ossigeno, di anidride carbonica, di umidità, la temperatura etc, rimangano entro i valori di riferimento reperibili in letteratura. Il collega Demontis col suo articolo mostra, *ad abundantiam*, per il caso dei capannoni da cui ha preso lo spunto, come tali volumi potrebbero essere determinati.

Potrebbero, ma pare che, in realtà, non possano! Infatti, come spesso accade in vari campi non appena ciò sia possibile, al *tutus* = sicuro viene preferito il *tutior* = più sicuro. In pratica, nell'approccio ad un problema, si opta, tra diverse soluzioni possibili, per quella che, per uno specifico aspetto ritenuto più rilevante, dà il più alto livello di sicurezza, ovvero tutela di più. È l'atteggiamento che, per derivazione da *tutior*, viene definito “tuzioristico”.

Siamo d'accordo tutti che, in generale, il “più sicuro” possa essere meglio del semplicemente “sicuro”. Nel caso in discorso però l'ampia ed esauriente trattazione dell'articolo mi ha spinto ad approfondire il seguente, ristretto, aspetto: adottare il detto atteggiamento quali conseguenze ha sull'atmosfera in termini di calore e di anidride carbonica?

I conteggi (non compresi nell'articolo) dell'ingegner Demontis individuano, per il totale dei 50.000 mc dei capannoni in discorso, i due seguenti scenari alternativi:

1) il ricambio occorrente in base al rispetto dei parametri è ottenibile, con buona abbondanza, con tre ventilatori da 70 Watt, che, nelle 16 ore di 260 giorni lavorativi, portano ad un consumo di 874 kWh/anno;

2) il ricambio occorrente in base al criterio puramente volumetrico di 0,5 mc/h a mc pieno per vuoto si ottiene con un impianto complesso della potenza minima di 3 kW, e quindi con un consumo annuo di 12.480 kWh.

Tra i due scenari si ha una differenza di circa 11.600 kWh per la cui disponibilità ai morsetti dell'appena detto impianto si ha, sempre su base annua, che:

- ipotizzando un rendimento reale complessivo dal generatore agli stessi morsetti pari a circa il 36%, occorre bruciare una quantità di combustibile pari a  $11.600/0,36 = 32.200 \text{ kWh} = 27.700.000 \text{ kCal}$ ; il 64% di questa quantità, ossia  $20.620 \text{ kWh} = 17.735.100 \text{ kCal}$  vanno a carico dell'atmosfera;
- assumendo, conformemente a dati Terna, che al consumo di un kWh elettrico è associata la produzione di 0,435 kg di CO<sub>2</sub>, vanno parimenti in atmosfera  $11.600 \times 0,435 = 5.046 \text{ kg}$  appunto di CO<sub>2</sub>.

Sappiamo che un mc di aria atmosferica viene considerato non salubre se il suo contenuto di tale gas passa dal valore standard di 0,75 grammi a quello di circa 10 grammi, per un incremento quindi di circa 9 g/mc. Se si suppone di distribuire i sopraddetti 5.046 kg in dosi di 9 g, si ottiene il risultato che vengono resi non più respirabili, ancora su base annua, qualcosa come 560.000 metri cubi d'aria. Dalla tabella 6 si ha che una persona in riposo ha bisogno di inspirare circa 10 mc di aria al giorno e quindi 3.650 mc all'anno;  $560.000/3.650 = 153$  è quindi, a solo titolo di esempio, il numero di persone, non lavoranti, che si troverebbero a respirare male, permanentemente, a fronte del relativo maggior grado di sicurezza dentro i capannoni.

Posto che le cifre esposte su CO<sub>2</sub> sono, sostanzialmente, frutto di convenzioni, che non si è considerato quanto avviene a valle dei morsetti dell'utenza e che però nella realtà gli scenari impostati nella maniera indicata non sono per niente rari, mi pare ci si possa chiedere se l'iter della nostra società sia veramente *tutum*.

Giuseppe Concu

che e non, le può fare ognuno di noi. Non posso evitare comunque di osservare l'ordine di grandezza del ricambio d'aria esterna necessario a mantenere l'aria interna in condizioni di salubrità per la respirazione e trarre delle considerazioni generali.

Dall'osservazione di detto ordine si comprende immediatamente che :

- una cosa è il ricambio d'aria esterno, assolutamente necessario per rifornire l'ossigeno consumato ed espellere il biossido di carbonio prodotto;
- altra cosa è l'aspetto termo-igrometrico dell'ambiente, che non necessita assolutamente di ricambi ma di apposito trattamento per controllare la temperatura e l'umidità. (Tutti abbiamo una pompa di calore in casa ma non ci sognamo di tenere le finestre aperte quando è in funzione...);
- altra cosa ancora è il trattamento igienico dell'aria, che può essere attuato in svariati modi in funzione degli inquinanti, ma che dev'essere comunque valutato su elementi concreti, numericamente, economicamente e soprattutto mediante scienza obiettiva.

La norma prevede un valore minimo pari a circa 1,6 volte il ricambio d'aria necessario per un ambiente da 10 mc per addetto. Sarebbe auspicabile che le norme sul ricambio d'aria venissero riconsiderate alla luce dell'attuale quadro normativo, adeguando le portate di ricambio ai volumi realmente disponibili così come è stato preso a cuore il far montare unità di recupero termico sull'espulso.

Quanto detto e non detto assume oggi particolare importanza in quanto in termini di risparmio energetico è primario non sprecare ed è perlomeno stravagante pensare di essersi lavati la coscienza prevedendo delle ulteriori macchine per recuperare ciò che non andava buttato. Vi sono numerosi esempi a sfavore di questo modo di produrre ricchezza, benessere e salute.

Giorgio Demontis