

**Nota tecnica: EN0077 Metodi di controllo dell'umidità per sistemi di dosaggio**

Sommario: Definisce i metodi per il controllo dell'umidità nei sistemi di dosaggio

Prodotti: Tutti i prodotti

Data di revisione: 15/10/2024 Autore: S. Cook

---

## 1 Sommario

Il presente documento spiega i metodi di controllo dell'umidità per sistemi di dosaggio. In genere, i sistemi di dosaggio sono costituiti da più silos o tramogge contenenti i materiali grezzi e da un mescolatore in cui gli stessi vengono miscelati per ottenere il prodotto finale.

Nella presente nota tecnica si utilizza il sistema di unità di misura internazionale. Il peso specifico dell'acqua viene considerato pari a 1. Trattandosi di variazioni trascurabili, non si tiene conto delle variazioni del peso specifico dell'acqua a temperature diverse.

## 2 Silos e tramogge

In genere le formulazioni e le ricette vengono specificate in base al peso secco del materiale. Nella pratica i materiali contengono normalmente dell'umidità, il che incide sul peso e sulla densità apparente del materiale. La variazione della densità apparente deriva dall'espansione delle (ad esempio, le sementi) o dalla variazione della tensione superficiale del materiale (ad esempio, la sabbia, che si ammassa a determinate percentuali di umidità).

### 2.1 Dosaggio in base al volume

La variazione di volume dovuta all'umidità è difficile da misurare; spesso non è lineare e, pertanto, risulta molto difficile correlare il corretto aggiustamento all'umidità. Hydronix consiglia di utilizzare sistemi ponderali anziché sistemi volumetrici.

### 2.2 Dosaggio in base al peso

La variazione di peso dovuta all'umidità è di tipo lineare. Anche se il peso specifico dell'acqua cambia al variare della temperatura, a fini pratici possiamo considerarlo al valore costante di 1, semplificando così il processo di controllo, in quanto 1 litro d'acqua può essere considerato pari a 1 kg.

**Esempio:**

Peso del materiale = 1.000 kg

Contenuto di umidità = 10%

$1.000 \times 0,1 = 100$  kg d'acqua

Peso specifico dell'acqua a 0°C (temp. di rif. 20°C) = 1,002

$100 \text{ kg} / 1,002 = 99,8$  L

Peso specifico dell'acqua a 37,8°C (temp. di rif. 20°C) = 0,995

$100 \text{ kg} / 0,995 = 100,5$  L

Questa variazione è inferiore all'accuratezza ottenibile con i sistemi industriali di dosaggio a batch, per cui d'ora in avanti nel presente documento il peso specifico dell'acqua viene considerato pari a 1 e tutti i dati relativi al materiale sono riferiti a tale valore.

Perché i sistemi di dosaggio a batch possano pesare accuratamente il materiale in tempi rapidi, bisogna per prima cosa dosare un'ampia proporzione di materiale (la cosiddetta "dose principale"), quindi si deve pesare il materiale dosato e aggiungere la quota restante di materiale più lentamente attraverso una serie di dosi di precisione. Una "dose di precisione" corrisponde all'apertura della valvola per un breve periodo di tempo in modo da consentire il passaggio di un piccolo quantitativo di materiale, dopodiché la valvola si richiude. Il materiale viene pesato dopo ogni dose di precisione finché non viene aggiunto tutto il quantitativo di materiale necessario.

Il controllo dell'umidità può essere integrato in questo processo senza influire sui tempi complessivi di dosaggio. Il peso finale di riferimento può essere aggiustato prima del dosaggio di precisione. Ciò dipende dalla variazione di umidità del materiale prevista. La dose di precisione dev'essere impostata su un valore inferiore a quello dell'intervallo di umidità del materiale. Dal momento che la pesatura a questo punto è meno accurata, è utile aggiungere una tolleranza del 5% sul valore, in modo da tenere conto di possibili risultati superiori o inferiori rispetto al valore di riferimento.

**Esempio:**

*Minima umidità prevista = 3%*

*Massima umidità prevista = 18%*

*Tolleranza = 5%*

*Intervallo di umidità = 18 - 3 = 15%*

*Dosaggio principale = 100 - 15 - 5 = 80%*

Durante la dose principale è importante calcolare la media delle misure di umidità del sensore. L'umidità varia nel corso del dosaggio, per cui la compensazione dev'essere basata sull'umidità complessiva, e non sulle singole letture al termine del dosaggio.

Il calcolo della media dev'essere effettuato con la funzione Averaging/Hold (Media/App) prevista sui sensori Hydronix. In questo modo si eliminano eventuali errori di lettura a livello delle uscite del sensore nel loop analogico (ad esempio, i disturbi presenti sul cavo o la risoluzione di una scheda d'ingresso analogica).

Il calcolo della media nel sensore può essere utilizzato energizzando l'ingresso digitale al sensore oppure tramite la connessione RS485.

Dopo la dose principale viene mantenuto il valore medio, che può essere ottenuto dal sensore, ed è possibile regolare il valore ponderale finale. Per calcolare il peso effettivo del materiale da pesare, applicare la formula seguente:

$$T = T_d(100\% + M\%)$$

**Figura 1: Calcolo del peso bagnato**

Dove:

T = Peso totale di materiale da aggiungere

T<sub>d</sub> = Peso secco di materiale richiesto per il dosaggio

M = Umidità del materiale (NB: 100% = 1, M% = Umidità/100)

**Esempio:**

*Peso secco finale del materiale = 1.000 kg*

*Dose principale = 80%*

*Dose principale finale = 1.000 x 0,8 = 800 kg*

*Peso effettivo della dose principale = 780 kg (che tiene conto di una tolleranza di errore ponderale)*

*Umidità media = 10%*

$Valore\ finale = 1.000 \times (100\% + 10\%) = 1.000 \times (1 + 0,1) = 1.100\ kg$

### 2.2.1 Processi di controllo

Per i sistemi dove la tramoggia o il silo contengono un solo tipo di materiale si consiglia di mantenere la calibratura nel sensore e d'impostare l'uscita del sensore sull'indicazione dell'umidità media. Per i sistemi che possono contenere materiali diversi in tempi diversi si consiglia d'impostare l'uscita del sensore sulla media Unscaled. Quindi la calibratura deve essere effettuata nel sistema di controllo.

**Pseudo codice per processo di dosaggio su tramoggia o silo con sensore configurato in base al valore di uscita dell'umidità.**

1. Impostare il valore finale della dose principale alla percentuale del valore finale che consenta l'overshoot e le variazioni di umidità (Nota: nell'esempio qui sopra, era 80%).
2. Aprire la valvola della tramoggia o del silo.
3. Iniziare il calcolo della media nel sensore energizzando l'ingresso digitale oppure inviando il comando di inizio calcolo della media sull'interfaccia RS485.
4. Mentre la scala ponderale è inferiore rispetto al valore finale, tenere aperta la valvola fino a raggiungere il valore finale.
5. Interrompere il calcolo della media diseccitando l'ingresso digitale o inviando un comando di arresto del calcolo della media tramite l'interfaccia RS485.
6. Chiudere la valvola della tramoggia o del silo.
7. Effettuare la lettura dell'umidità media dal sensore e calcolare il peso finale utilizzando l'equazione in figura 1.
8. Mentre la scala ponderale è inferiore rispetto al valore finale, aprire e chiudere la valvola per brevi periodi di tempo (dosaggio di precisione) finché il valore finale non rientra in una tolleranza accettabile.

Per i sistemi che devono mantenere più calibrature è necessario calcolare l'umidità dal valore Unscaled. Il che è semplice, dato che la risposta del sensore all'aumento di umidità è lineare.

$$Umidità\% = B \cdot Unscaled + C - D$$

**Figura 2: Calcolo dell'umidità da valore Unscaled**

Dove:

B = Variazione Unscaled per variazione di umidità % (gradiente)

C = Correzione (valore Unscaled teorico con umidità = 0)

D = Valore di assorbimento

**Nota: Il valore D è richiesto solo se si vuole visualizzare l'umidità libera anziché l'umidità totale; altrimenti può essere impostato a 0.**

### 2.2.2 Calibratura del materiale

Durante la calibratura del materiale il contenuto di umidità del materiale e il valore Unscaled corrispondente al livello di umidità dovrebbero essere acquisiti in più punti, preferibilmente su tutto l'intervallo di funzionamento del materiale. L'intervallo di funzionamento del materiale si colloca fra il valore minimo e quello massimo di umidità possibile del materiale durante la produzione. Si consiglia di prevedere almeno 3 punti nell'intervallo di funzionamento. I sensori Hydronix non sono utilizzabili per misurare valori di umidità inferiori al valore di assorbimento idrico del materiale, per cui si raccomanda di mantenere i materiali al di sopra di questo valore.

**Esempio:**

*La sabbia ha un valore di assorbimento idrico dell'1,5% e si satura al 16%.*

*In produzione la sabbia dev'essere mantenuta sopra al 2% e il limite di aggiunta dell'acqua non deve superare l'8%.*

*Pertanto l'intervallo di funzionamento è del 2-8%.*

*I campioni di sabbia dovrebbero essere raccolti indicativamente al 2, al 5 e all'8%.*

Per calcolare i valori B e C da più punti, per quanto esistano numerosi metodi, la regressione lineare dei minimi quadrati è forse il metodo più comune ed è anche quello consigliato da Hydronix.

$$B = \frac{\sum \text{Valori di umidità} \cdot \text{Valori Unscaled} - \left( \frac{\sum \text{Valori di umidità} \cdot \sum \text{Valori Unscaled}}{\text{Numero di punti}} \right)}{\sum \text{Valori Unscaled}^2 - \left( \frac{\sum \text{Valori Unscaled} \cdot \sum \text{Valori Unscaled}}{\text{Numerodi punti}} \right)}$$

**Figura 3: Calcolo del valore B**

$$C = \frac{\sum \text{Valori di umidità} - B \cdot \sum \text{Valori Unscaled}}{\text{Numero di punti}}$$

**Figura 4: Calcolo del valore C**

**Esempio**

Unscaled	Umidità
20	2
30	5
40	8

$$B = \frac{((20 \cdot 2) + (30 \cdot 5) + (40 \cdot 8)) - ((2 + 5 + 8) \cdot (20 + 30 + 40) / 3)}{((20 + 30 + 40) \cdot (20 + 30 + 40) / 3) - ((20^2 + 30^2 + 40^2) - ((20 + 30 + 40) \cdot (20 + 30 + 40) / 3))}$$

$$B = \frac{(510 - (15 \cdot 90 / 3))}{((400 + 900 + 1600) - (90 \cdot 90 / 3))}$$

$$B = \frac{60}{(2900 - 2700)}$$

$$B = 60 / 200$$

$$B = 0,3$$

$$C = \frac{((2 + 5 + 8) - 0,3 \cdot (20 + 30 + 40))}{3}$$

$$C = \frac{(15 - 27)}{3}$$

$$C = -4$$

### 3 Mescolatori

In genere il controllo dell'umidità nei mescolatori si effettua aggiungendo acqua fino ad ottenere il valore di riferimento. Questa operazione può essere effettuata con un metodo di calcolo o con il metodo a flusso irregolare. Il metodo di calcolo prevede la misurazione dell'umidità del materiale, quindi il calcolo del quantitativo d'acqua da aggiungere in una singola dose.

**Il metodo di calcolo richiede la pesatura accurata del secco.**

**Il metodo a flusso irregolare è più tollerante all'imprecisione del peso secco, ma è più lento rispetto al metodo di calcolo.**

**Il metodo a flusso irregolare richiede una pressione dell'acqua regolare.**

Nel presente documento ci occupiamo dei processi di controllo associati ai diversi metodi. Per ulteriori informazioni sull'impiego dei diversi metodi si rimanda ai Capitoli 4 e 5 della Guida per l'operatore Hydro-Control (HC07) (HD1048),

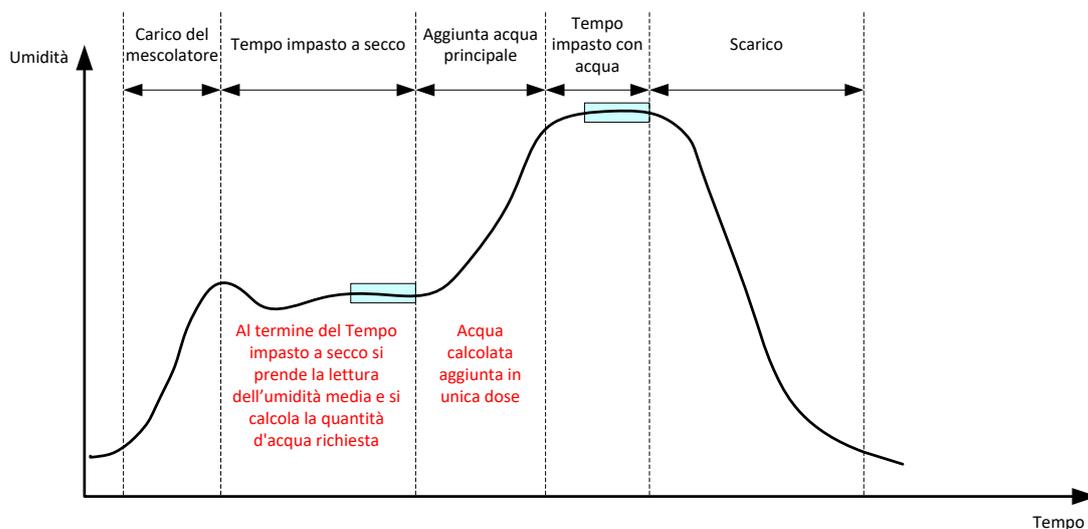
dove il metodo di calcolo è indicato come modalità "CALC", mentre il metodo a flusso irregolare è indicato come modalità "AUTO".

È importante notare che nella miscelazione, diversamente da quanto avviene con le tramogge e i silos che in genere contengono un solo tipo di materiale per volta, vengono lavorati assieme materiali diversi.

Una miscela di materiali può essere vista come un unico materiale, purché i vari costituenti restino nelle stesse proporzioni e abbiano il tempo di omogeneizzarsi. Di norma, una miscela di materiali viene chiamata "ricetta" o "formulazione" a seconda del settore industriale, ma praticamente si tratta della stessa cosa.

Un ciclo di miscelazione prevede le seguenti operazioni:

1. Aggiunta dei materiali
2. Miscelazione dei materiali fino ad ottenere un segnale stabile
3. Aggiunta d'acqua
4. Miscelazione dei materiali con l'acqua fino ad ottenere un segnale stabile
5. Scarico del materiale

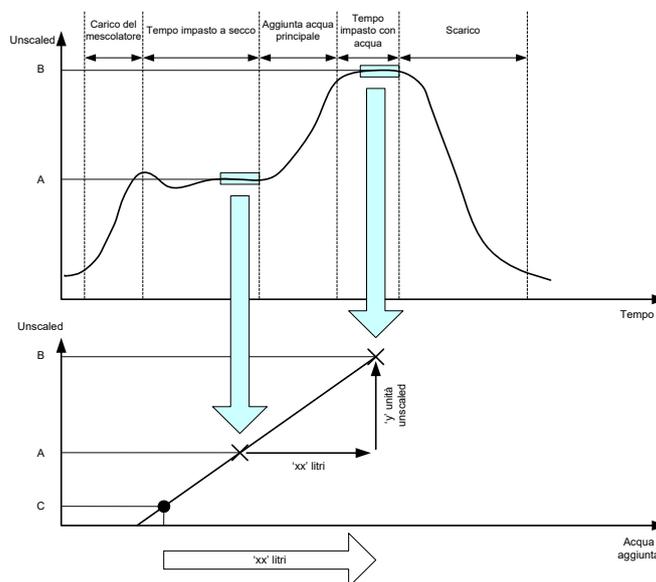


**Figura 5 - Ciclo di miscelazione**

Dovendo aggiungere materiali differenti in stadi diversi, o nel caso in cui l'aggiunta di materiali (ad esempio, metalli) influisca negativamente sul segnale del sensore, potrebbe essere necessario ripetere le fasi 2-4.

### 3.1 Esecuzione del metodo di calcolo

Per calcolare il quantitativo d'acqua da aggiungere si deve utilizzare il valore "Unscaled" dal sensore. Ai fini del calcolo, è necessario che l'operatore utilizzi un metodo manuale, che consenta di aggiungere un quantitativo d'acqua predeterminato in base alla configurazione della ricetta e alle conoscenze dell'operatore stesso riguardo al contenuto di umidità dei materiali in ingresso. In questo modo l'operatore ha la possibilità di definire una miscela di riferimento. La Figura 6 mostra il processo dell'impasto di riferimento



**Figura 6: I punti di calibratura dal ciclo di miscelazione**

Una misurazione stabile viene ottenuta al termine del tempo d'impasto a secco e del tempo d'impasto con acqua. Si consiglia di calcolare la media del segnale dal sensore per almeno cinque secondi.

La variazione Unscaled per unità d'incremento di umidità (gradiente del grafico) può essere calcolata come indicato in figura 7.

$$B = \frac{100 \cdot \text{Acqua}}{\text{Peso a secco}(\text{Unscaled}_{\text{umido}} - \text{Unscaled}_{\text{secco}})}$$

*N.B: Il valore 100 è un fattore di riduzione per consentire l'uso del valore B nell'equazione della figura 2*

#### **Figura 7: Calcolo del gradiente di aggiunta d'acqua**

Si noti che il peso a secco è il peso a secco totale di tutti i materiali aggiunti, ad esclusione dell'acqua e dell'eventuale umidità già presente nel materiale in ingresso.

Nella ricetta il valore dell'impasto con acqua e il valore B devono essere registrati per l'uso durante la produzione. Per calcolare il quantitativo d'acqua da aggiungere ad una ricetta o formulazione a secco si può utilizzare l'equazione in figura 8.

$$\text{Acqua richiesta} = \frac{\text{Peso a secco} \cdot B \cdot (\text{Unscaled}_{\text{finale}} - \text{Unscaled}_{\text{corrente}})}{100}$$

***N.B: Il valore 100 è un fattore di riduzione per consentire l'uso del valore B nell'equazione della figura 2***

#### **Figura 8: Calcolo dell'acqua richiesta durante l'impasto**

Per calcolare il valore di umidità è necessario applicare una correzione. Per calcolare una correzione l'utente deve definire il valore finale di umidità. Questo valore può essere ottenuto mediante prove di laboratorio sul prodotto finito oppure - se non è possibile (ad esempio, nella produzione di calcestruzzo, dove la reazione chimica inizia trasformando l'acqua in altra sostanza) - si può calcolare il contenuto di umidità come indicato in figura 9.

$$\% \text{ umidità finale} = \frac{100 (\text{acqua in materiali grezzi} + \text{acqua aggiunta durante la miscelazione})}{\text{Peso a secco totale dei materiali}}$$

**Figura 9: Calcolo dell'umidità finale del prodotto**

Per convertire il valore Unscaled del sensore in contenuto di umidità per la visualizzazione è possibile calcolare la correzione come indicato in figura 10.

$$C = \text{Umidità}_{\text{finale}} - \text{Unscaled}_{\text{finale}} \cdot B$$

**Figura 10: Calcolo della correzione per la calibratura**

A questo punto è possibile visualizzare l'umidità utilizzando l'equazione della figura 2.

### 3.2 Implementazione del metodo di flusso irregolare

La forma più efficace di metodo di flusso irregolare prevede di modificare la portata dell'acqua in modo che quando si comincia ad aggiungere acqua la portata sia elevata e che, via via che il livello di umidità della ricetta si avvicina all'umidità finale, la portata si riduca in modo da non superare il valore di riferimento. Il modo più comune di procedere è implementando un controllo Proporzionale-Integrale-Derivato (PID, Proportional Integral Derivative). La maggior parte dei sistemi PLC dispone di PID predisposti in blocchi funzione.

Per chiarimenti sui controlli PID vedere il Capitolo 9, punto 3.3 della guida HD1048.

Se il sistema di miscelazione dispone di valvola l'operazione è relativamente semplice. Il sistema dovrebbe memorizzare un valore di guadagno proporzionale, un valore di guadagno integrale ed un valore di guadagno derivato. Dal momento che i sistemi di miscelazione non sono in grado di ripristinarsi in caso di overshoot (eccesso d'acqua), il valore derivato dev'essere impostato a 0.

L'uscita di comando della valvola proporzionale può quindi essere impostata tramite la seguente equazione.

$$u(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

Dove

$K_p$ : Guadagno proporzionale, parametro di ottimizzazione

$K_i$ : Guadagno integrale, parametro di ottimizzazione

$K_d$ : Guadagno derivato, parametro di ottimizzazione

$e$ : Errore = Valore finale (Unscaled) – Valore corrente (Unscaled)

$t$ : Tempo o tempo istantaneo (il presente)

$T$ : Variabile d'integrazione; considera i valori dal tempo 0 al presente  $t$ .

$MV(t)$  = Variabile manipolata (o uscita di comando). Limitata a 0-100 nel caso delle valvole.

Sostanzialmente, la parte proporzionale è una semplice percentuale d'errore, per cui quanto maggiore è l'errore, tanto maggiore sarà la risposta. La parte integrale è la somma dell'errore nel tempo. Quanto maggiore è la durata dell'errore, tanto maggiore sarà la risposta all'errore. La parte derivata è la percentuale di variazione d'errore. Se la percentuale di variazione d'errore è elevata, l'effetto del controllo derivato è maggiore. Questo si nota soprattutto durante gli overshoot, dove la percentuale di variazione dell'errore accelera nella direzione sbagliata, riducendo di conseguenza l'aggressività del loop.

### Esempio

Finale = 50 Unscaled  
 Guadagno proporzionale,  $K_p = 5$   
 Guadagno integrale,  $K_i = 0,1$   
 Guadagno derivato,  $K_d = 0$

@ tempo,  $t = 0$   
 Corrente Unscaled = 30

$MV(t) = 5(50-30) + 0,1(50-30) + 0(50-30)$   
 $MV(t) = 100 + 2 + 0$   
 $MV(t) = 102$

Limite  $>MV(t)$ , per uscita di comando (C.O) = 100

@ $t=1$   
 Corrente Unscaled = 40

$MV(t) = 5(50-40) + 0,1(50-40) + 0,1(50-30) + 0(50-40)$   
 $MV(t) = 50 + 1 + 2 + 0$   
 $MV(t) = 53$   
 C.O. = 53

@ $t=2$   
 Corrente Unscaled = 45 (la riduzione dell'incremento come C.O. adesso è  $< 100$ )

$MV(t) = 5(50-45) + 0,1(50-45) + 0,1(50-40) + 0,1(50-30) + 0(50-48)$   
 $MV(t) = 25 + 0,5 + 1 + 2 + 0$   
 $MV(t) = 28,5$   
 C.O. = 28,5

@ $t=3$   
 Corrente Unscaled = 50  
 $MV(t) = 5(50-50) + 0,1(50-50) + 0,1(50-45) + 1(50-40) + 0,1(50-30) + 0(50-50)$   
 $MV(t) = 0 + 0 + 0,5 + 1 + 2 + 0$   
 C.O. = 3,5

*A questo punto il valore di riferimento è stato raggiunto e si può disattivare la valvola. Se non fosse stato utilizzato il guadagno integrale, la valvola sarebbe stata chiusa molto dopo che il valore si fosse avvicinato a quello di riferimento, rallentando così l'incremento in modo significativo, il che comporta tempi di aggiunta acqua maggiori, ma un minor rischio che si verifichino overshoot. Nei processi in cui parte dell'acqua va perduta, quanto più lungo è il tempo di miscelazione, tanto di più questo guadagno integrale aumenta l'aggressività del loop, man mano che passa il tempo per eliminare in modo efficace lo sbilanciamento provocato dalle perdite.*

Dato che la maggior parte dei sistemi miscelatori non è in grado di sopportare aggiunte eccessive, è necessario introdurre una regione a banda morta. Si tratta in genere di uno sbilanciamento rispetto al valore di riferimento vero per impedire l'overshoot. Ad esempio, se il valore di riferimento dell'umidità era del 5%, si potrebbe introdurre uno sbilanciamento dello 0,2% per arrestare il controller al 4,8%. Ciò compensa il tempo fra l'aggiunta d'acqua e il tempo necessario perché l'acqua venga miscelata e misurata dal sensore.

Nel caso di sistemi che hanno solo valvole digitali anziché valvole proporzionali, è necessario imitare per quanto possibile il comportamento di una valvola proporzionale. Un metodo semplice per farlo è illustrato nell'esempio qui sotto

### **Esempio**

1. *Definire un periodo ciclico come tempo che ci vuole per il passaggio di una valvola da chiusa ad aperta, e viceversa.*
2. *Definire un periodo di controllo, ad esempio 5 periodi ciclo.*
3. *Dopo ogni periodo ciclo calcolare  $MV(t)$ .*
4.  $80 < MV(t) \leq 100$  = La valvola resta aperta per 5 periodi ciclo  
 $60 < MV(t) < 80$  = La valvola resta aperta per 4 periodi ciclo e chiusa per 1 periodo ciclo  
 $40 < MV(t) < 60$  = La valvola resta aperta per 3 periodi ciclo e chiusa per 2 periodi ciclo  
 $20 < MV(t) < 40$  = La valvola resta aperta per 2 periodi ciclo e chiusa per 3 periodi ciclo  
 $0 < MV(t) < 20$  = La valvola resta aperta per 1 periodi ciclo e chiusa per 4 periodi ciclo

Come con tutti i controlli PID, sono necessari alcuni tentativi per ottenere valori che assicurino prestazioni ottimali per il sistema di miscelazione.