

**Nota de ingeniería: EN0077 Métodos de control de la humedad para sistemas de división en lotes**

Resumen: define métodos para el control de la humedad en sistemas de división en lotes

Productos afectados: todos los productos

Fecha de revisión: 20/03/2018 Autor: S.Cook

---

## 1 Resumen

Esta nota de ingeniería explica métodos de control de humedad para sistemas de división en lotes. Habitualmente, un sistema de división en lotes consiste en un número de silos o tolvas de materia prima y una mezcladora que combina estos materiales para crear un producto final.

Se utiliza el Sistema internacional de unidades a lo largo de esta nota de ingeniería. También asume que la gravedad específica del agua es 1. No tiene en cuenta cambios en la gravedad específica del agua a temperaturas diferentes, dado que este cambio es insignificante.

## 2 Silos y tolvas

La fórmulas o recetas se especifican la mayoría de las veces según el peso seco de un material. En la práctica, es bastante habitual que los materiales contengan humedad. Esto afecta al peso del material y a su densidad a granel. Este cambio en la densidad a granel se debe a que las propias partículas se expanden, por ejemplo semillas, o a que el material cambia su tensión de superficie, por ejemplo la arena que se aglomera junta con determinados contenidos de humedad.

### 2.1 División en lotes por volumen

El cambio en el volumen debido a la humedad es difícil de calcular, a menudo no es lineal y relacionar el ajuste correcto a realizar en base a la humedad es por lo tanto muy difícil de lograr. Hydronix recomienda sustituir los sistemas volumétricos por sistemas de peso.

### 2.2 División en lotes por peso

El cambio en el peso debido a la humedad es un cambio lineal. Aunque es cierto que la gravedad específica del agua cambia con la temperatura, para todos los intentos prácticos y objetivos, se puede tratar como una constante de 1. Esto ayuda a simplificar el proceso de control dado que se puede considerar que 1 l de agua es 1 kg.

#### Ejemplo:

Peso del material 1000 kg

Contenido de humedad = 10 %

$1000 \times 0,1 = 100$  kg de agua

Gravedad específica del agua a 0 °C (temp. ref. 20 °C) = 1002

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

Gravedad específica del agua a 37,8°C (temp. ref. 20 °C) = 0,995

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

Este cambio es inferior a la precisión que se puede conseguir de un sistema de división en lotes por peso industrial y por lo tanto, el resto de esta nota asumirá una gravedad del agua específica de 1. También asumirá que todos los datos de material se referenciarán según esta hipótesis.

Para que los sistemas de división en lotes por peso puedan pesar material de forma precisa y eficiente, primero es necesario tomar una dosis de gran proporción del material, llamada la dosis principal, pesar el material de la dosis y a continuación añadir el requisito de material restante de manera más lenta a través de una serie de dosis finas. Una dosis fina consiste en abrir la compuerta durante un periodo de tiempo breve y permitir que una pequeña cantidad de material pase a través de ella y a continuación cerrar la compuerta. El material se pesa después de cada dosis fina hasta que se haya añadido la cantidad de material solicitada.

El control de humedad se puede integrar a este proceso sin ningún coste para el tiempo de división en lotes general. El peso objetivo final se puede ajustar antes de realizar las dosis finas. Esto depende de la variación de humedad esperada en el material. La dosis principal se debe ajustar a un valor inferior al intervalo de humedad del material. Dado que pesar en este punto es menos preciso, es lógico añadir un 5 % de tolerancia en el valor para tener en cuenta cualquier exceso o falta en el objetivo.

#### **Ejemplo:**

*Humedad más seca esperada = 3 %*

*Humedad más mojada esperada = 18 %*

*Tolerancia = 5 %*

*Intervalo de humedad = 18 - 3 = 15 %*

*Dosis principal = 100 - 15 - 5 = 80 %*

Durante la dosis principal es importante obtener el promedio de las mediciones de humedad del sensor. La humedad puede variar durante el proceso del lote y la compensación se debe basar en la humedad general y no en cualquier lectura individual al final del lote.

El cálculo del promedio se debe realizar mediante la función Promedio/Retenido ofrecida por los sensores Hydronix. Esto elimina cualquier error que pueda tener lugar por la lectura de las salidas del sensor durante el bucle analógico, salidas como ruido en el cable o la resolución de una entrada de tarjeta analógica.

El cálculo del promedio en el sensor se puede utilizar activando la entrada digital o mediante la conexión RS485.

Después de la dosis principal se retiene el valor promedio calculado y se puede obtener del sensor y se puede ajustar el peso final. Para calcular el peso actual del material que debe pesarse, se debe aplicar la fórmula siguiente:

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

#### **Ilustración 1: Cálculo del peso mojado**

Donde:

T = peso total del material a añadir

T<sub>d</sub> = peso seco del material necesario para dividir en lotes

M = humedad del material (NB: 100 % = 1, M % = humedad/100)

#### **Ejemplo:**

*Peso seco objetivo del material = 1 000 kg*

*Dosis principal = 80 %*

*Dosis principal objetivo = 1 000 x 0,8 = 800 kg*

*Peso de dosis principal real = 780 kg (permite algo de error en el peso)*

*Promedio de humedad = 10 %*

*Objetivo final = 1 000 x (100 % + 10 %) = 1 000 x (1 + 0,1) = 1 100 kg*

## 2.2.1 Procesos de control

Para sistemas donde la tolva o el silo solo alojará un material, se recomienda que la calibración se realice en el sensor y que se ajuste la salida del sensor para ofrecer el promedio de humedad. Para los sistemas que puedan alojar varios materiales en momentos diferentes, se recomienda que la salida del sensor se ajuste a valores Sin escalar promedio. Por lo tanto la calibración se debe realizar en el sistema de control.

### **Pseudocódigo para proceso de división en lotes en tolva/silo donde se configura el sensor para obtener valores de humedad.**

1. Configure la dosis principal objetivo a un porcentaje del objetivo final que permita un exceso más la variación de humedad (nota: en el ejemplo anterior esto era 80 %).
2. Abra la compuerta de la tolva o silo.
3. Empiece a calcular el promedio en el sensor activando la entrada digital o enviando el comando de inicio del cálculo del promedio a través de RS485.
4. Aunque la báscula sea inferior al objetivo, mantenga la compuerta abierta hasta alcanzar el objetivo.
5. Detenga el cálculo del promedio desactivando la entrada digital o enviando el comando de final del cálculo del promedio a través de RS485.
6. Cierre la compuerta de la tolva o silo.
7. Utilice la lectura del promedio de humedad del sensor y calcule el peso objetivo final mediante la ecuación de la ilustración 1.
8. Mientras que la báscula sea inferior al objetivo final, abra y cierre la compuerta durante periodos cortos (dosificación fina) hasta que el objetivo final se encuentre dentro de la tolerancia aceptable.

Para sistemas que deban alojar calibraciones múltiples, es necesario calcular la humedad a partir del valor sin escalar. Esto es sencillo dado que la respuesta del sensor ante la adición de humedad es lineal.

$$\% \text{ de humedad} = B. \text{sin escalar} + C - D$$

### **Ilustración 2: Cálculo de la humedad a partir del valor sin escalar**

Donde:

B = cambio sin escalar por % de cambio de humedad (gradiente)

C = compensación (valor sin escalar teórico cuando humedad = 0)

D = valor de absorción

**Nota: el valor D solo es necesario si se va a mostrar humedad libre en vez de la humedad total, de lo contrario se puede ajustar a 0.**

## 2.2.2 Calibración de materiales

Durante la calibración del material, el contenido de humedad del material y el valor sin escalar en esa humedad se deben recopilar en varios puntos, preferentemente en todo el intervalo de trabajo del material. El intervalo de trabajo del material se encuentra entre la humedad más baja posible del material durante la producción y la más alta. Se recomienda tener al menos 3 puntos por encima del intervalo de trabajo. Los sensores Hydronix no se pueden utilizar para medir humedades por debajo del valor de absorción de agua de un material y por lo tanto se recomienda mantener los materiales por encima de este valor.

**Ejemplo:**

Una arena tiene un valor de absorción de agua del 1,5 %, está saturada al 16 %.

En producción, la humedad en la arena se debe mantener por encima de un mínimo del 2 % con un máximo del 8 %, de lo contrario el agua añadida con la arena llevará el proceso por encima del nivel de agua objetivo.

El intervalo de trabajo se encuentra por lo tanto entre el 2 y el 8 %.

Se deben recoger muestras para la arena a aproximadamente 2, 5 y 8 %.

Para calcular los valores B y C de puntos múltiples, aunque existen muchos métodos, usar la regresión por mínimos cuadrados lineal es tal vez el más común. Es el método que recomienda Hydronix.

$$B = \frac{\sum \text{Valores de humedad} \cdot \text{Valores sin escalar} - \left( \frac{\sum \text{Valores de humedad} \cdot \sum \text{Valores sin escalar}}{\text{Número de puntos}} \right)}{\sum \text{Valores sin escalar}^2 - \left( \frac{\sum \text{Valores sin escalar} \cdot \sum \text{Valores sin escalar}}{\text{Número de puntos}} \right)}$$

**Ilustración 3: Cálculo del valor B**

$$C = \frac{\sum \text{Valores de humedad} - B \cdot \sum \text{Valores sin escalar}}{\text{Número de puntos}}$$

**Ilustración 4: Cálculo del valor C**

**Ejemplo**

| Sin escalar | Humedad |
|-------------|---------|
| 20          | 2       |
| 30          | 5       |
| 40          | 8       |

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

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

$$B = 60 / (2900 - 2700)$$

$$B = 60 / 200$$

$$B = 0,3$$

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

$$C = (15 - 27) / 3$$

$$C = -4$$

### 3 Mezcladoras

El control de humedad en las mezcladoras consiste normalmente en añadir agua hasta un valor objetivo. Esto se puede realizar ya sea mediante un método de cálculo o con un método de alimentación controlada. Un método de cálculo implica medir la humedad del material y a continuación calcular la cantidad de agua a añadir en una dosis.

**El método de cálculo requiere pesos secos de material precisos.**

**El método de alimentación controlada es más resistente a pesos secos imprecisos, pero es más lento que el método de cálculo.**

**El método de alimentación controlada requiere tener disponible una presión de agua consistente.**

Este documento abarca los procesos de control involucrados en cada método. Para más explicaciones sobre el uso de cada método, consulte los capítulos 4 y 5 de HD0456, la guía para operarios de Hydro-Control VI.

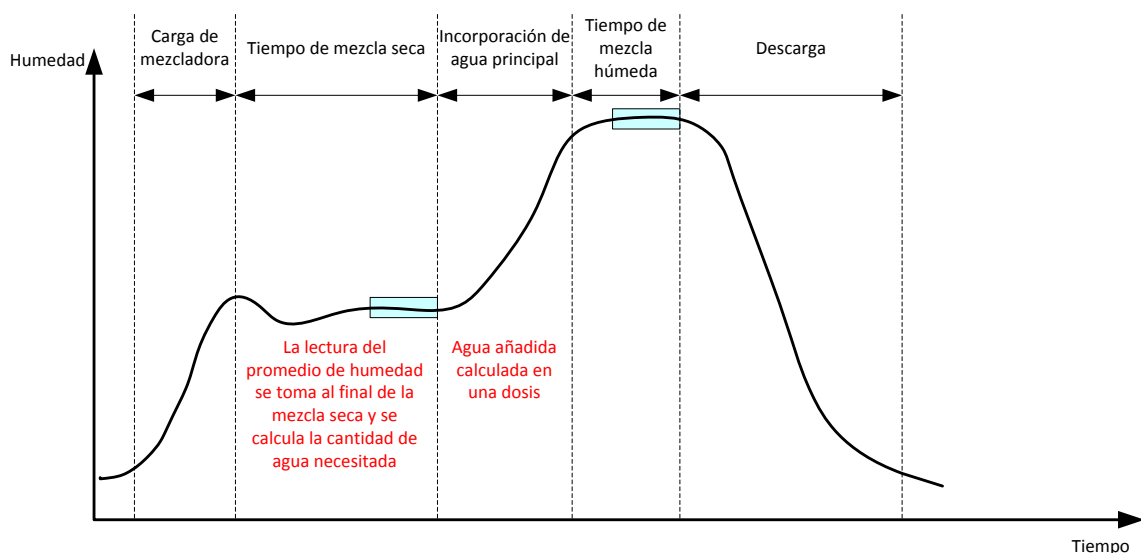
En HD0456, se hace referencia al modo de cálculo como modo «CALC». Se hace referencia al método de alimentación controlada como modo «AUTO».

Es importante tener en cuenta que mezclar, a diferencia de tolvas y silos que normalmente alojan un único material a la vez, implica mezclar materiales.

Una mezcla de materiales se puede considerar como un material siempre que los materiales constituyentes permanezcan en las mismas proporciones y se permita el tiempo suficiente para mezclarlos y que se vuelva homogéneo. Una mezcla de materiales se llama normalmente receta o fórmula según el tipo de industria. Son esencialmente lo mismo.

Un ciclo de mezcla se compone de:

1. Añadir materiales
2. Mezclar los materiales hasta alcanzar una señal estable
3. Añadir agua
4. Mezclar los materiales y el agua hasta alcanzar una señal estable
5. Descargar el material

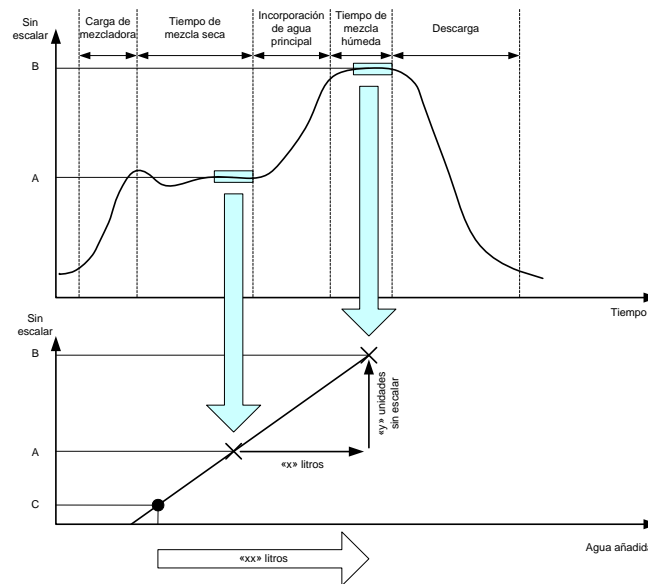


**Ilustración 5: Ciclo de mezcla**

Es posible que sea necesario repetir los pasos 2 a 4 si es necesario añadir materiales diferentes en diferentes fases o si añadir materiales (como metales) tiene un efecto adverso en la señal del sensor.

### 3.1 Implementar el método de cálculo

Para calcular cuánta agua añadir, se debe utilizar el valor sin escalar del sensor. Para realizar el cálculo es necesario permitir que el operario utilice un método manual donde se puede añadir una cantidad predeterminada de agua en base al diseño de la receta y el conocimiento de los operarios sobre el contenido de humedad de los materiales entrantes. Esto permitirá al operario crear una mezcla de referencia. La ilustración 6 muestra el proceso de la mezcla de referencia



**Ilustración 6: Los puntos de calibración del ciclo de mezcla**

Se obtiene una medición estable al final del tiempo de mezcla seca y al final del tiempo de mezcla mojada. Se recomienda realizar el promedio de la señal del sensor durante al menos cinco segundos.

El cambio sin escalar por unidad del incremento de humedad (el gradiente en el gráfico) se puede calcular como se muestra en la ilustración 7.

$$B = \frac{100 \cdot \text{Agua}}{\text{Peso seco} (\text{Sin escalar}_{\text{mojado}} - \text{Sin escalar}_{\text{seco}})}$$

*N.B.: el valor 100 es un factor de escala para poder utilizar el valor B en la ecuación de la ilustración 2*

#### Ilustración 7: Cálculo del gradiente de adición de agua

Se debe tener en cuenta que el peso seco es el peso seco total de todos los materiales añadidos sin contar el agua y cualquier humedad ya presente en el material entrante.

En la receta, el valor de mezcla mojada y el valor B se deben registrar para uso durante la producción. Para calcular cuánta agua añadir a una receta o fórmula seca, se puede utilizar la ecuación en la ilustración 8.

$$\text{Agua necesaria} = \frac{\text{Peso seco} \cdot B \cdot (\text{Sin escalar}_{\text{objetivo}} - \text{Sin escalar}_{\text{actual}})}{100}$$

**Nota: el valor 100 es un factor de escala para poder utilizar el valor B en la ecuación de la ilustración 2**

#### **Ilustración 8: Calcular el agua necesaria durante una mezcla**

Para calcular un valor de humedad es necesario aplicar una compensación. Calcular una compensación requiere que el usuario defina el valor de humedad final. Esto se puede obtener realizando pruebas de laboratorio del producto acabado o si esto no es posible (como en la producción de hormigón donde una reacción química empieza a convertir el agua en otra sustancia) el contenido de humedad se puede calcular con la ilustración 9.

$$\% \text{ final de humedad} = \frac{100 (\text{agua en materias primas} + \text{agua añadida durante la mezcla})}{\text{Peso seco total de los materiales}}$$

#### **Ilustración 9: Calcular la humedad final de un producto**

Para convertir el valor sin escalar del sensor a contenido de humedad para fines de visualización, se debe calcular una compensación como se muestra en la ilustración 10.

$$C = \text{Humedad}_{\text{objetivo}} - \text{Sin escalar}_{\text{objetivo}} \cdot B$$

#### **Ilustración 10: Calcular la compensación para la calibración**

A continuación es posible visualizar la humedad con la ecuación de la ilustración 2.

### **3.2 Implementar el método de alimentación controlada**

La forma más efectiva del método de alimentación controlada incluye alterar el caudal de agua de forma que al inicio de la adición de agua el caudal sea alto y a medida que el nivel de humedad de la receta se acerque a la humedad objetivo, se reduce el caudal para no sobrepasar el objetivo. La forma más habitual de hacer esto es implementando un controlador derivativo integral y proporcional (controlador PID). Muchos sistemas PLC cuentan con controladores PID como bloques de función integrados.

Para una explicación más completa de un controlador PID consulte HD0456 capítulo 8 sección 3.3.

Si el sistema de la mezcladora tiene una válvula proporcional acoplada, hacer esto es relativamente fácil. El sistema debe almacenar un valor de ganancia proporcional, un valor de ganancia integral y un valor de ganancia derivativa. Dado que los sistemas de mezcla no puede recuperarse de un exceso (demasiada agua), el valor derivativo debe establecerse en 0.

La salida de control para la válvula proporcional se puede calcular a continuación mediante la siguiente ecuación.

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

donde

$K_p$ : ganancia proporcional, un parámetro de ajuste

$K_i$ : ganancia integral, un parámetro de ajuste

$K_d$ : ganancia derivativa, un parámetro de ajuste

$e$ : error = valor objetivo (sin escalar) - valor actual (sin escalar)

$t$ : tiempo o tiempo instantáneo (el presente)

$T$ : variable de integración; adopta valores desde tiempo 0 al presente  $t$ .

$VM(t)$  = variable manipulada (o salida de control). Esto está limitado de 0 a 100 en el caso de una válvula.

Esencialmente, la parte proporcional es un sencillo ratio de error y por lo tanto cuanto mayor sea el error, mayor será la respuesta. La parte integral es la suma del error durante el tiempo. Cuanto más tiempo exista un error, mayor será la respuesta al error. La parte derivativa es el índice de cambio del error. Si el índice de cambio en el error es alto, entonces el efecto del control derivativo es mayor. Esto se observa mucho mejor durante el exceso, donde el índice de cambio del error se acelera en la dirección equivocada y reduce así la agresividad del bucle.

### Ejemplo

Objetivo = 50 sin escalar  
Ganancia proporcional,  $K_p = 5$   
Ganancia integral,  $K_i = 0,1$   
Ganancia derivativa,  $K_d = 0$

en Tiempo,  $t = 0$   
Actual sin escalar = 30

$VM(t) = 5(50-30) + 0.1(50-30) + 0(50-30)$   
 $VM(t) = 100 + 2 + 0$   
 $VM(t) = 102$

> límite  $VM(t)$ , por lo tanto salida de control (S.C) = 100

en  $t=1$   
Actual sin escalar = 40

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

en  $t=2$   
Actual sin escalar = 45 (reducción en incremento dado que S.C es ahora < 100)

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

en  $t=3$   
Actual sin escalar = 50  
 $VM(t) = 5(50-50) + 0.1(50-50) + 0,1(50-45) + 1(50-40) + 0,1(50-30) + 0(50-50)$   
 $VM(t) = 0 + 0 + 0,5 + 1 + 2 + 0$   
S.C = 3,5

*Llegados a este punto el objetivo se ha alcanzado y se puede apagar la válvula. Si no se hubiese utilizado ninguna ganancia integral la válvula se habría cerrado más a medida que el valor actual se acercara al objetivo, ralentizando así el incremento de manera significativa. Esto conlleva tiempos de adición de agua más largos pero es menos probable que cause un exceso. En procesos donde hay una reacción química con el agua durante el tiempo de mezcla, la ganancia integral aumentará la agresividad del bucle a medida que pase el tiempo. Esto eliminará la compensación causada por la reacción química.*



Dado que la mayoría de mezcladoras no pueden permitirse exceder las adiciones, es necesario introducir una región de banda muerta. Normalmente esto es una compensación del objetivo real para evitar el exceso. Por ejemplo, si el objetivo era un humedad del 5 %, se puede introducir una compensación del 0,2 % para detener el controlador al 4,8 %. Esto compensa el tiempo entre que se añade el agua y el tiempo que tarda el agua en mezclarse y que la mida el sensor.

En el caso de sistemas que solo tienen válvulas digitales en vez de válvulas proporcionales, es necesario imitar lo máximo posible una válvula proporcional. Un método sencillo para hacerlo se explica en el ejemplo a continuación

### **Ejemplo**

1. *Defina un periodo de ciclo como el tiempo que tarda en cambiar una válvula de apagado a encendido y de vuelta a apagado.*
2. *Defina un periodo de control, por ejemplo, esto puede ser 5 periodos de ciclo.*
3. *Tras cada periodo de control, calcule  $VM(t)$ .*
4.  $80 < VM(t) \leq 100$  = la válvula permanece encendida durante 5 periodos de ciclo  
 $60 < VM(t) < 80$  = la válvula permanece encendida durante 4 periodos de ciclo y apagada durante 1 periodo de ciclo  
 $40 < VM(t) < 60$  = la válvula permanece encendida durante 3 periodos de ciclo y apagada durante 2 periodos de ciclo  
 $20 < VM(t) < 40$  = la válvula permanece encendida durante 2 periodos de ciclo y apagada durante 3 periodos de ciclo  
 $0 < VM(t) < 20$  = la válvula permanece encendida durante 1 periodo de ciclo y apagada durante 4 periodos de ciclo

Como con todos los controladores PID, se necesita un poco de experimentación para obtener valores que alcancen un rendimiento óptimo para el sistema de mezcla.