

## Nota de Engenharia: Métodos de controlo da humidade para sistemas de lote EN0077

Resumo: Delineia os métodos para controlo de humidade em sistemas de lotes

Produtos afetados: Todos os produtos

Data da revisão: 20/03/2018 Autor: S.Cook

---

### 1 Resumo

Esta nota de engenharia explica os métodos de controlo de humidade para sistemas de lotes. Um sistema de lotes costuma ser constituído por uma série de tremonhas ou silos de matérias-primas e um misturador para a combinação destes materiais e a criação de um produto final.

Esta nota de engenharia usa o Sistema Internacional de Unidades de Medida. Também presume que a gravidade específica da água é 1. Não tem em consideração alterações na gravidade específica da água a diferentes temperaturas, uma vez que esta alteração é negligenciável.

### 2 Silos e tremonhas

As fórmulas ou receitas são normalmente especificadas pelo peso do material seco. Na prática, é muito comum que os materiais contenham humidade. Isto afeta o peso do material e a sua densidade a granel. Esta alteração da densidade a granel deve-se à expansão das partículas propriamente ditas, por exemplo, sementes ou mudança da tensão superficial do material, como é o caso da areia a formar grumos quanto se atinge um certo teor de humidade.

#### 2.1 Lotes por volume

A mudança do volume devido a humidade é difícil de mensurar. Muitas vezes, não é linear, o que torna muito difícil a correlação do ajuste a realizar com base na humidade. A Hydronix recomenda que os sistemas volumétricos sejam substituídos por sistemas de pesagem

#### 2.2 Lotes por peso

A mudança do peso devido a humidade é uma alteração linear. Embora seja verdade que a gravidade específica da água muda de facto com a temperatura, para todos os efeitos práticos, pode ser tratada como uma constante de 1. Isso ajuda a simplificar o processo de controlo, uma vez que 1 L de água pode ser considerado 1 kg.

##### Exemplo:

Peso do material: 1000 kg

Teor de humidade = 10%

$1000 \times 0,1 = 100$  kg de água

Gravidade específica da água a 0 °C (temperatura de referência de 20 °C) = 1002

$100 \text{ kg}/1002 = 99,8$  L

Gravidade específica da água a 37,8 °C (temperatura de referência de 20 °C) = 0,995

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

Esta alteração é inferior à precisão possível de um sistema industrial de lotes por peso. Assim, o remanescente desta nota irá presumir uma gravidade específica de água de 1. Também irá presumir que todos os dados do material serão referenciados com base nesta presunção.

Para que os sistemas de lotes por peso possam pesar o material de forma precisa e eficiente, é necessário dosear uma grande proporção do material primeiro, conhecido como a dose principal, pesar o material que foi doseado e depois adicionar o material restante necessário mais lentamente, ao longo de uma série de doses finas. Uma dose fina é a abertura da porta durante um pequeno período de tempo, possibilitando que uma pequena quantidade de material passe por ela, e depois o seu fecho. O material é pesado após cada dose fina, até que a quantidade necessária de material seja adicionada.

O controlo de humidade pode ser integrado neste processo sem quaisquer custos para o tempo de doseamento por lotes a nível global. O peso-alvo final pode ser ajustado antes do doseamento fino. Isto depende da variação de humidade esperada no material. A dose principal deve ser definida para menos do que o intervalo de humidade do material. Uma vez que a pesagem, nesta altura, é menos precisa, faz sentido adicionar uma tolerância de 5% ao valor, para compensar eventuais excessos ou defeitos, em relação ao objetivo.

#### **Exemplo:**

*Humidade mais seca esperada = 3%*

*Humidade mais molhada esperada = 18%*

*Tolerância = 5%*

*Intervalo de humidade = 18 – 3 = 15%*

*Dose principal = 100 – 15 – 5 = 80%*

Durante a dose principal, é importante perfazer uma média das medições de humidade do sensor. A humidade varia no decurso do lote, pelo que a compensação deverá basear-se na humidade global e não numa leitura única, no final do lote.

O cálculo da média deve ser realizado com a função Média/Manter, fornecida pelos sensores Hydronix. Isso elimina os erros que possam ocorrer com a leitura de resultados do sensor ao longo do circuito analógico, tais como ruído no cabo ou a resolução de uma entrada de uma placa analógica.

O cálculo da média no sensor pode ser usado por energização da entrada digital para o sensor ou através da ligação RS485.

Após a dose principal, a média de valores é mantida e pode ser obtida pelo sensor, possibilitando o ajuste do peso-alvo final. Para calcular o peso real do material que precisa de ser pesado, deve ser aplicada a seguinte fórmula:

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

#### **Figura 1: Cálculo do peso húmido**

Onde:

T = Peso total do material a adicionar

T<sub>d</sub> = Peso seco do material necessário para o lote

M = Humidade do material (nota: 100% = 1, M% = Humidade/100)

#### **Exemplo:**

*Peso de material seco alvo = 1000 kg*

*Dose principal = 80%*

*Dose principal alvo = 1000 x 0,8 = 800 kg*

*Peso de dose principal real = 780 kg (permitindo alguma margem de erro)*

*Humidade média = 10%*

*Objetivo final = 1000 x (100%+10%) = 1000 x (1 + 0,1) = 1100 kg*

## 2.2.1 Processos de controlo

Para os sistemas em que a tremonha/o silo venha a conter apenas um único material, recomendamos que a calibragem seja realizada no sensor e que o resultado do sensor seja definido para indicar a humidade média. Para sistemas que possam conter vários materiais em diferentes alturas, recomendamos que o resultado do sensor seja definido para a média, mas Não Graduado. A calibragem tem de ser realizada no sistema de controlo.

**Pseudocódigo para o processo por lote de tremonha/silo, onde o sensor está configurado para fornecer a humidade como resultado.**

1. Defina a dose principal alvo para uma percentagem do objetivo final que permita excessos mais variação da humidade (nota: no exemplo acima, foi 80%).
2. Abra a porta da tremonha/do silo.
3. Comece o cálculo da média no sensor por energização da entrada digital ou através do envio do comando de início de cálculo da média via RS485.
4. Enquanto a balança for inferior ao alvo, mantenha a porta aberta até o objetivo ser alcançado.
5. Pare o cálculo da média por desenergização da entrada digital ou através do envio do comando de fim de cálculo da média via RS485.
6. Feche a porta da tremonha/do silo.
7. Com a leitura da humidade média do sensor, calcule o peso-alvo final usando a equação da Figura 1.
8. Enquanto a balança for inferior ao alvo final, abra e feche a porta durante períodos curtos (doseamento fino), até que o alvo final se encontre dentro de uma tolerância aceitável.

Para sistemas que tenham de manter várias calibrações, é necessário calcular a humidade a partir do valor Não Graduado. Isso é simples, uma vez que a resposta do sensor ao crescimento de humidade é linear.

$$\text{Humidade \%} = B \cdot \text{Não Graduado} + C - D$$

**Figura 2: Cálculo da humidade a partir do valor Não Graduado**

Onde:

B = Mudança de Não Graduado por mudança de % Humidade (gradiente)

C = Desvio (valor Não Graduado teórico quando a humidade = 0)

D = Valor de adsorção

**Nota: o valor D é apenas necessário se se pretender indicar a humidade livre e não a humidade total. Caso contrário, pode ser definido para 0.**

## 2.2.2 Calibragem de material

Durante a calibragem de material, o teor de humidade do material e o valor Não Graduado nessa humidade devem ser recolhidos em vários pontos, preferivelmente ao longo de todo o intervalo de funcionamento do material. O intervalo de funcionamento do material varia entre a humidade mínima possível do material durante a produção e a máxima. Recomendamos pelo menos 3 pontos ao longo do intervalo de funcionamento. Os sensores Hydronix não podem ser usados para medir as humidades abaixo do valor de adsorção da água de um material. Por isso, recomendamos que os materiais sejam mantidos acima deste valor.

**Exemplo:**

A areia tem um valor de adsorção de água de 1,5%, sendo saturada a 16%.

Em produção, a areia será mantida acima de 2%. Demasiada água é adicionada ao processo acima de 8%.

O intervalo de funcionamento é, por isso, 2-8%.

Devem ser recolhidas amostras para a areia a, aproximadamente, 2, 5 e 8%.

Para o cálculo dos valores B e C de vários pontos, embora existam muitos métodos, o uso de regressão linear segundo o método dos mínimos quadrados deve ser o mais comum. É o método recomendado pela Hydronix.

$$B = \frac{\sum \text{Valores de Humidade} \cdot \text{Valores Não Graduados} - \left( \frac{\sum \text{Valores de Humidade} \cdot \sum \text{Valores Não Graduados}}{\text{Número de pontos}} \right)}{\sum \text{Valores Não Graduados}^2 - \left( \frac{\sum \text{Valores Não Graduados} \cdot \sum \text{Valores Não Graduados}}{\text{Número de pontos}} \right)}$$

**Figura 3: Cálculo do valor B**

$$C = \frac{\sum \text{Valores de Humidade} - B \cdot \sum \text{Valores Não Graduados}}{\text{Número de pontos}}$$

**Figura 4: Cálculo do valor C**

**Exemplo**

Não Graduado	Humidade
20	2
30	5
40	8

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

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

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

$$B = \frac{60}{200}$$

$$B = 0,3$$

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

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

$$C = -4$$

### 3 Misturadores

O controlo de humidade nos misturadores consiste, normalmente, na adição de água até um valor-alvo. Tal pode ser feito através de um método de cálculo ou um método de gotejamento. Um método de cálculo envolve a medição da humidade do material e depois o cálculo da quantidade de água a adicionar numa dose.

**O método de cálculo implica medições precisas do material seco.**

**O método de gotejamento é mais resistente a pesos secos imprecisos, mas é mais lento do que o método de cálculo.**

**O método de gotejamento implica que esteja disponível uma pressão de água consistente.**

Este documento abrange os processos de controlo envolvidos em cada um dos métodos. Para mais informações sobre a utilização de cada método, consulte os capítulos 4 e 5 do HD0456, o Guia do Operador do Hydro-Control VI.

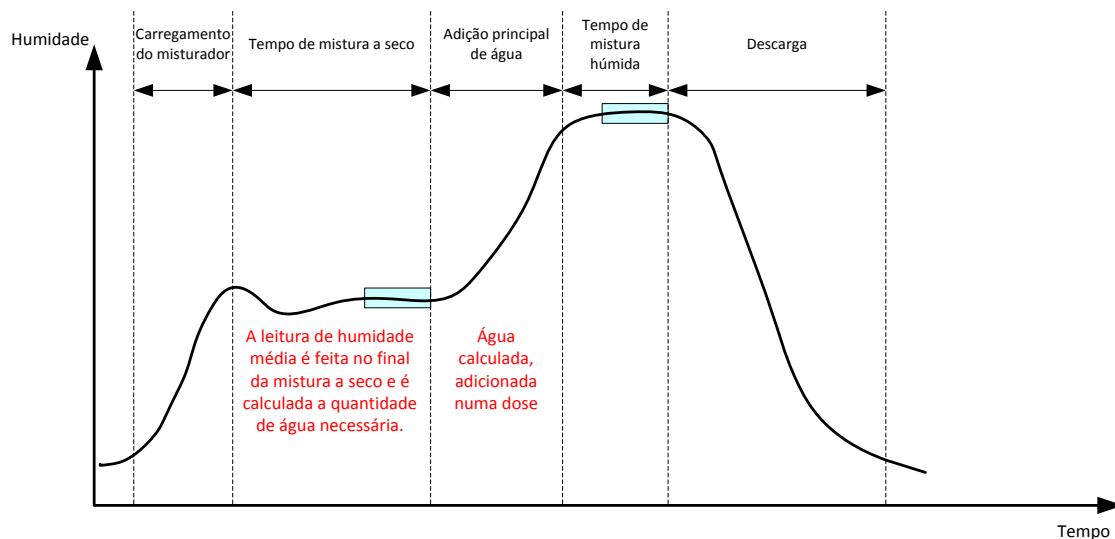
No HD0456, o modo de cálculo é designado de modo "CALC". O método de gotejamento é designado de modo "AUTO".

É importante ter em consideração que a mistura, ao contrário de tremonhas e silos, que normalmente têm um único material, qualquer que seja a altura em que esteja, envolve a junção de materiais.

Uma mistura de materiais pode ser considerada um único material, desde que os constituintes se mantenham nas mesmas proporções e tenham tempo suficiente para que a mistura resulte num produto homogéneo. Dependendo do tipo de indústria, uma mistura de materiais costuma ser chamada de receita ou fórmula. Na sua essência, são a mesma coisa.

Um ciclo de mistura será constituído por:

1. Adição de materiais
2. Mistura de materiais, até que um sinal estável seja alcançado
3. Adição de água
4. Mistura de materiais e água, até que um sinal estável seja alcançado
5. Descarga do material

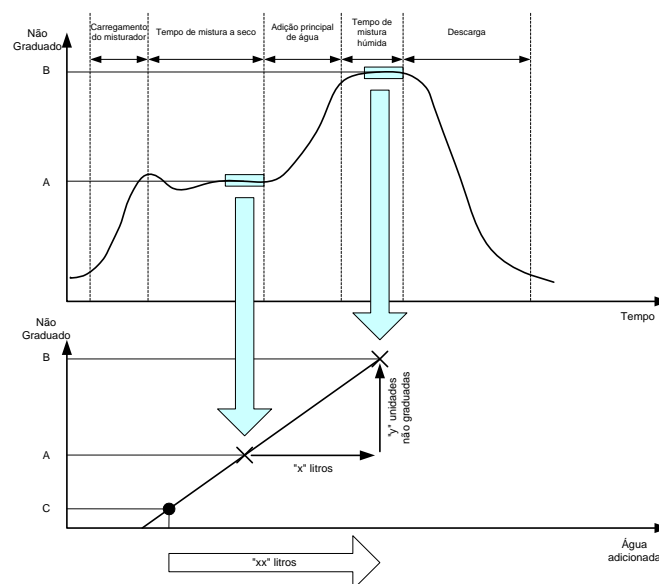


**Figura 5 - Ciclo de mistura**

Pode ser necessário repetir os passos 2-4 se diferentes materiais precisarem de ser adicionados em diferentes fases ou se a adição de materiais (como metais) causar um efeito adverso sobre o sinal do sensor.

### 3.1 Implementação do método de cálculo

Para calcular a quantidade de água a adicionar, deve ser usado o valor Não Graduado do sensor. Para fazer o cálculo, é necessário permitir ao operador o uso de um método manual, onde uma quantidade predeterminada de água pode ser adicionada, com base na conceção da fórmula e no conhecimento do operador do teor de humidade dos materiais introduzidos. Isso permitirá ao operador a criação de uma mistura de referência. A Figura 6 mostra o processo da mistura de referência.



**Figura 6: Os pontos de calibragem do ciclo de mistura**

Uma medição estável é obtida no final do tempo de mistura a seco e no final do tempo de mistura húmida. Recomendamos que o sinal do sensor seja nivelado por um valor médio durante, pelo menos, cinco segundos.

A mudança de Não Graduado por unidade de aumento de humidade (o gradiente do gráfico) pode ser calculada da forma apresentada na Figura 7.

$$B = \frac{100 \cdot \text{Água}}{\text{Peso seco}(\text{Não Graduado}_{\text{húmido}} - \text{Não Graduado}_{\text{seco}})}$$

*Nota: o valor 100 é um fator de escalonamento para permitir que o valor B seja usado na equação da Figura 2*

#### Figura 7: Cálculo do gradiente de adição de água

De referir que o peso seco é o peso seco total de todos os materiais adicionados, à exceção de água e de qualquer humidade já no material introduzido.

Na fórmula, o valor da mistura húmida e o valor B devem ser registados para uso durante a produção. Para calcular a quantidade de água a adicionar a uma fórmula ou receita seca, pode ser usada a equação da Figura 8.

$$\text{Água necessária} = \frac{\text{Peso seco} \cdot B \cdot (\text{Não Graduado}_{\text{alvo}} - \text{Não Graduado}_{\text{atual}})}{100}$$

**Nota: o valor 100 é um fator de escalonamento para permitir que o valor B seja usado na equação da figura 2**

### Figura 8: Cálculo da água necessária durante uma mistura

Para calcular um valor de humidade, é necessário aplicar um desvio. O cálculo de um desvio requer que o utilizador declare o valor de humidade final. Isso é possível de obter através de testes laboratoriais ao produto terminado ou, se tal não for possível (como é o caso em produção de betão, em que uma reação química começa a converter água noutra substância), o teor de humidade pode ser calculado usando a Figura 9.

$$\% \text{ Humidade Final} = \frac{100 (\text{água em matérias} - \text{primas} + \text{água adicionada durante a mistura})}{\text{Peso a seco total do material}}$$

### Figura 9: Cálculo da humidade final do produto

Para converter o valor Não Graduado do sensor em teor de humidade, para fins de apresentação, é necessário calcular um desvio, da forma apresentada na Figura 10.

$$C = \text{Humidade}_{\text{alvo}} - \text{Não Graduado}_{\text{alvo}} \cdot B$$

### Figura 10: Cálculo do desvio para a calibragem

Então, será possível apresentar a humidade, com a equação da Figura 2.

## 3.2 Implementar o método de gotejamento

A forma mais eficaz de método de gotejamento envolve a alteração do débito de fluxo de água, de forma a que, no início da adição da água, o débito de fluxo seja elevado. À medida que o nível de humidade da fórmula se for aproximando da humidade-alvo, o débito de fluxo é reduzido de forma a não exceder o objetivo. A forma mais comum de o fazer é implementar um Controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo). A maioria dos sistemas PLC tem Controladores PID como blocos de função integrados.

Para uma explicação mais exaustiva de um Controlador PID, consulte o HD0456 cap. 8, secção 3.3.

Se o sistema do misturador tiver uma válvula proporcional, é algo relativamente simples de fazer. O sistema deve guardar um valor de ganho proporcional, um valor de ganho integral e um valor de ganho derivativo. Uma vez que os sistemas de mistura não conseguem recuperar de um excesso (demasiada água), o valor derivativo deve ser definido para 0.

O Resultado de Controlo para a válvula proporcional pode, então, ser desenvolvido com a seguinte equação.

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

Em que

$K_p$ : ganho proporcional, um parâmetro de ajuste

$K_i$ : ganho integral, um parâmetro de ajuste

$K_d$ : ganho derivativo, um parâmetro de ajuste

$e$ : erro = valor-alvo (Não Graduado) – valor atual (Não Graduado)

$t$ : tempo ou tempo instantâneo (o presente)

$T$ : variável de integração; assume valores do 0 ao presente  $t$ .

MV( $t$ ) = variável manipulada (ou Resultado de Controlo). Limitada a 0-100, no caso de uma válvula.

Essencialmente, a parte proporcional é uma proporção simples de erros. Por isso, quanto maior o erro, maior a resposta. A parte integral é a soma de erros ao longo do tempo. Quanto mais tempo existir um erro, maior a resposta ao erro. A parte derivativa é a taxa de mudança de erro. Se a taxa de mudança no erro for elevada, então o efeito do controlo derivativo será maior. Isso é mais fortemente observado durante um excesso, em que a taxa de mudança de erro acelera na direção errada, reduzindo, assim, a agressividade do circuito.

### Exemplo

Objetivo = 50, Não Graduado

Ganho proporcional,  $K_p = 5$

Ganho integral,  $K_i = 0.1$

Ganho derivativo,  $K_d = 0$

@ Tempo,  $t = 0$

Não Graduado atual = 30

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

$$MV(t) = 100 + 2 + 0$$

$$MV(t) = 102$$

>MV(t) limite, portanto, Resultado de Controlo (C. O.) = 100

@ $t=1$

Não Graduado atual = 40

$$MV(t) = 5(50-40) + 0,1(50-40) + 0,1(50-30) + 0(50-40)$$

$$MV(t) = 50 + 1 + 2 + 0$$

$$MV(t) = 53$$

$$C. O. = 53$$

@ $t=2$

Não Graduado atual = 45 (redução de aumento, uma vez que o C. O. é agora < 100)

$$MV(t) = 5(50-45) + 0,1(50-45) + 0,1(50-40) + 0,1(50-30) + 0(50-48)$$

$$MV(t) = 25 + 0,5 + 1 + 2 + 0$$

$$MV(t) = 28,5$$

$$C. O. = 28,5$$

@ $t=3$

Não Graduado atual = 50

$$MV(t) = 5(50-50) + 0,1(50-50) + 0,1(50-45) + 1(50-40) + 0,1(50-30) + 0(50-50)$$

$$MV(t) = 0 + 0 + 0,5 + 1 + 2 + 0$$

$$C. O. = 3,5$$

*Nesta altura, foi atingido o objetivo e a válvula pode ser desligada. Se não tivesse sido usado ganho integral, a válvula ter-se-ia fechado mais, à medida que o valor fosse alcançando o objetivo, atrasando significativamente o aumento. O resultado são tempos de adição de água mais prolongados, mas uma menor probabilidade de excesso. Em processos em que se perde*



*alguma água, quanto mais a mistura demorar, mais o ganho integral aumentará a agressividade do circuito à medida que o tempo passa, eliminando eficazmente o desvio causado por perdas.*

Uma vez que a maioria dos sistemas de mistura não pode exceder adições, é necessário introduzir uma região de zona morta. Isso é, normalmente, um desvio do verdadeiro objetivo, a fim de prevenir um excesso. Por exemplo, se o objetivo fosse 5% de humidade, podia ser introduzido um desvio de 0,2% para parar o controlador a 4,8%. Isso serve de compensação pelo tempo entre a adição da água e o tempo que demora a água misturar-se e ser medida pelo sensor.

No caso dos sistemas que apenas têm válvulas digitais, em vez de válvulas proporcionais, é necessário imitar uma válvula proporcional tão bem quanto possível. Um método simples para o conseguir encontra-se no exemplo abaixo.

### **Exemplo**

1. *Defina um período de ciclo, como o tempo que leva a comutar uma válvula de desligada para ligada, e depois de volta à posição desligada.*
2. *Defina um período de controlo. Por exemplo, pode ser cinco períodos de ciclo.*
3. *Após cada período de controlo, calcule a  $MV(t)$ .*
4.  $80 < MV(t) \leq 100$  = Válvula fica ligada durante cinco períodos de ciclo  
 $60 < MV(t) \leq 80$  = Válvula fica ligada durante quatro períodos de ciclo e desligada durante um período de ciclo  
 $40 < MV(t) \leq 60$  = Válvula fica ligada durante três períodos de ciclo e desligada durante dois períodos de ciclo  
 $20 < MV(t) \leq 40$  = Válvula fica ligada durante dois períodos de ciclo e desligada durante três períodos de ciclo  
 $0 < MV(t) \leq 20$  = Válvula fica ligada durante um período de ciclo e desligada durante quatro períodos de ciclo

Tal como sucede com todos os Controladores PID, é necessário levar a cabo alguma experimentação para obter valores que alcancem um desempenho ótimo para o sistema de mistura.