

**TESIS DOCTORAL**

**MODELO NUMERICO DE CALCULO Y SIMULACION  
DE TORRES DE PRILLING**

**presentada por**

**MANEL QUERA MIRÓ**

**en la**

**ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D' ENGINYERS  
INDUSTRIALS DE TERRASSA  
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA**

**para la obtención del**

**GRADO DE DOCTOR INGENIERO INDUSTRIAL**

**TERRASSA, SEPTIEMBRE 1993**

**CAPITULO 3 : MODELO NUMERICO 2 DE CALCULO Y SIMULACION  
DE TORRES DE PRILLING  
( PROGRAMA TP2C Y PROGRAMA TP2S )**

### 3.1.- INTRODUCCION

En el presente capítulo se especifican los etapas seguidas para la elaboración, puesta a punto y contrastación experimental del modelo numérico de cálculo y simulación de torres de prilling tipo 2 (pulverizador rotativo), cuyas características generales se han indicado en el apartado 1.2.

A continuación se resumen algunos de los aspectos más importantes, relativos al desarrollo de dicho modelo numérico.

#### Hipótesis de cálculo

Las hipótesis de cálculo generales que se han adoptado para definir el modelo físico de torres de prilling ya se han especificado previamente en el apartado 1.3.2.

No obstante, se resumen a continuación los puntos más significativos de dichas hipótesis.

- 1) La composición del fertilizante no varía durante el proceso de prilling.
- 2) Los prills son de forma esférica, durante el proceso de prilling, sin sufrir deformaciones.
- 3) El prill no sufre proceso de contracción de volumen por solidificación.  
(  $\rho$  líquido  $\rho$  sólido = cte )
- 4) La transferencia de calor en el interior del prill es por conducción radial uniforme, tanto en la fase líquida, como en la fase sólida.  
Se desprecian los posibles fenómenos de convección natural en la fase líquida.
- 5) Las propiedades termofísicas ( conductividad térmica, calor específico ) de la fase sólida y de la fase líquida del prill se consideran constantes, para el margen de temperaturas de trabajo.
- 6) La velocidad neta de caída del prill en la torre no es constante.

Se supone que el prill es expulsado del pulverizador rotativo a una velocidad inicial horizontal determinada y sigue una trayectoria de tipo parabólico, de forma que, en la base de la torre, su velocidad final será prácticamente la velocidad límite de caída.

#### Modelo físico de torres de prilling

El modelo físico adoptado para las tres torres de prilling tipo 1, ya ha sido definido en el apartado 1.3.2.

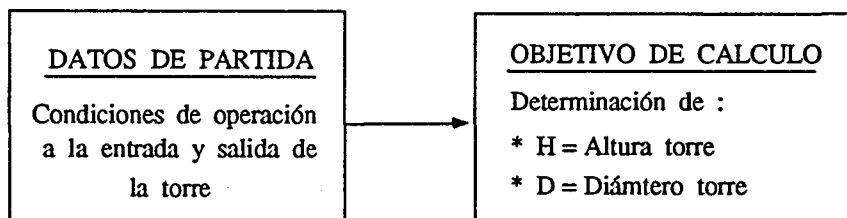
De forma resumida, dicho modelo considera dividida las torres en 3 secciones :

- Sección 1 = Enfriamiento del prill líquido.
- Sección 2 = Solidificación del prill.
- Sección 3 = Enfriamiento del prill sólido.

## Metodología general de cálculo de torres de prilling

La metodología general de cálculo de torres de prilling tipo 2 ya ha sido especificada, de forma general, en el apartado 1.3.3.

De forma resumida, el proceso general para dimensionar una torre de prilling se resume en el esquema adjunto.



El modelo numérico de cálculo de torres de prilling tipo 2 está compuesto básicamente por 2 algoritmos :

### 1) Algoritmo numérico de transmisión de calor

Permite resolver el proceso de transmisión de calor prill-aire, determinando el tiempo de residencia del prill en cada sección de la torre y el perfil de temperatura del prill en todo instante.

Dicho algoritmo es, en esencia, muy similar al desarrollado en el capítulo 2, para el modelo numérico 1 de torres de prilling.

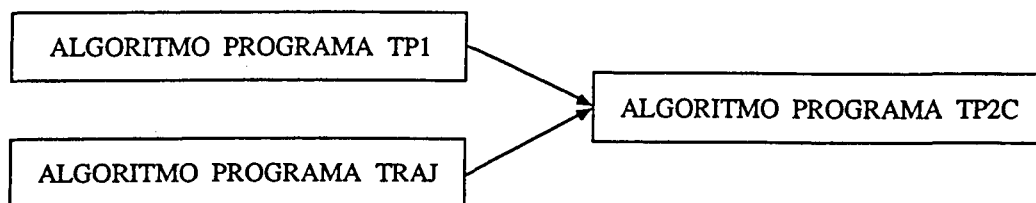
En este sentido, toda la información, derivada del desarrollo y puesta a punto de dicho algoritmo, es utilizado aquí para este nuevo modelo de torres.

### 2) Algoritmo numérico de trayectoria del prill

Permite determinar la evolución de la velocidad y trayectoria del prill en la torre, parámetros que tal como se especifica en el apartado 3.3, no son determinables analíticamente.

El desarrollo de este nuevo algoritmo se realiza en los apartados 3.2 y 3.3. (Programa TRAJ ).

Estos algoritmos se han integrado en un programa general de cálculo ( Programa TP2C ), que permite determinar, en todo instante, el estado térmico del prill ( perfil de temperatura ) y su posición en la torre ( velocidad, altura y alcance ).



En definitiva con dicho programa podrá determinarse :

- \* El tiempo de residencia del prill en cada sección de la torre.
- \* La altura de cada sección de la torre y la altura total de la misma.
- \* El perfil de la temperatura final del prill.

El desarrollo y puesta a punto de dicho modelo de cálculo de torres de prilling se realiza en el apartado 3.4.

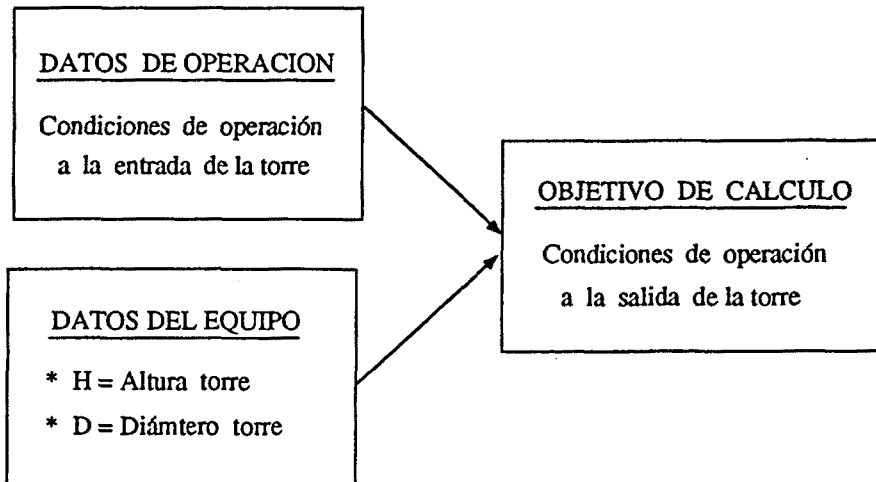
### Contrastación experimental

La puesta a punto del algoritmo numérico conjunto del programa TP2C, se ha realizado tomando de referencia los datos experimentales de una torre de prilling de urea de referencia. ( cf. apartado 1.4 ).

Esta es una torre de prilling del tipo 2 ( pulverizador rotativo ), por lo que dicha puesta a punto servirá asimismo como contrastación experimental de modelo numérico 2 de cálculo de torres de prilling.

### Metodología general de simulación de torres de prilling

La metodología general de torres de prilling ya ha sido especificada, de forma general, en el apartado 1.3.3.



El modelo numérico de simulación de torres de tipo 2 ( programa TP2S ) está compuesto básicamente por los mismos algoritmos numéricos que el modelo de cálculo ( Programa TP2C ).

La diferencia fundamental entre dichos modelos radica en su modo de operación :

- 1) En el caso del programa TP2C ( cálculo de la torre ), el resultado principal de cálculo es la altura de la torre, operando el programa, según una iteración sobre la temperatura final del prill conocida ( TSTOP ).

- 2) En el caso del programa TP2S (simulación de la torre ), el resultado principal de cálculo es TSTOP, iterando el programa sobre la altura de la torre conocida.

El modelo de simulación de torres de prilling se desarrolla en el apartado 3.5, siendo utilizado posteriormente ( capítulo 4 ), para realizar un análisis paramétrico de torres de prilling.

### 3.2.- MODELO FISICO DE PULVERIZADOR ROTATIVO.

#### Antecedentes

Uno de los datos básicos de operación del modelo numérico de cálculo 2 de torres de prilling es la velocidad inicial de salida del prill del pulverizador.

Según las referencias bibliográficas, dicho parámetro es determinable, de forma semiempírica, a partir de las características físicas y condiciones de operación del pulverizador.

Desafortunadamente el pulverizador es uno de los equipos de la torre de prilling del que, prácticamente, no existen referencias bibliográficas, ya que usualmente se halla protegido bajo patente.

A pesar de estos condicionantes, ha podido realizarse una estimación de la velocidad inicial del prill, a partir de las siguientes fuentes de información :

- 1) Modelo físico de pulverizador rotativo, propuesto por Steenwinkel, como resumen de las experiencias de la compañía holandesa Stamicarbon [ 14 ].  
(Única referencia bibliográfica de interés de la que se tiene conocimiento, relativa a pulverizadores rotativos de torres de prilling).
- 2) Características físicas y condiciones de operación del pulverizador rotativo de la torre de prilling de urea de referencia ( Cf. apartado 1.4 ).  
(Información suministrada por cortesía de Ercros) [ 20 ].

#### Modelo físico de pulverizador rotativo, propuesto por Steenwinkel [ 14 ].

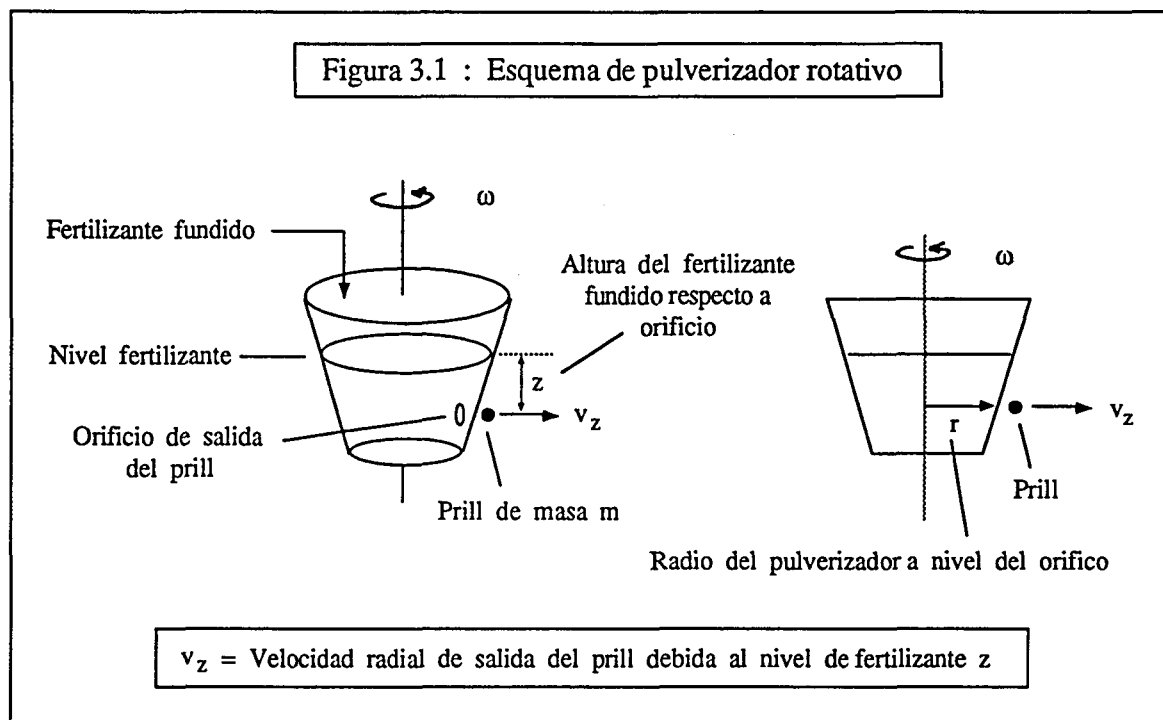
El pulverizador rotativo está constituido básicamente por un tronco de cono hueco invertido, abierto en su base superior y cerrado por su base inferior, presentando una serie de orificios en su superficie lateral y dotado de un movimiento rotativo, según su eje vertical.

El fertilizante fundido es introducido en el pulverizador por su parte superior y es expulsado del mismo, en forma de prills o partículas esféricas, a través de sus orificios laterales, con una velocidad horizontal de salida determinada, que puede desglosarse en dos componentes : velocidad radial y velocidad tangencial ( Cf. figura 3.2 ).

Según Steenwinkel, la velocidad radial de salida del prill ( $v_z$ ), debida al nivel de fertilizante en el pulverizador, puede estimarse, a partir del balance de energía del pulverizador, referido al orificio de salida del prill ( Cf. figura 3.1 ) :

$$\begin{aligned} \text{Energía potencial} &= \text{Energía cinética} &+& \text{Pérdidas por fricción} &+& \text{Pérdidas por fricción debidas al} \\ &\text{salida prill} && \text{a través del orificio} && \text{efecto deslizamiento (slip effect)} \\ \\ mgz &= m v_z^2 / 2 &+& E_f &+& m r^2 (\omega^2 - \omega_s^2) / 2 \end{aligned}$$

Las pérdidas por fricción, debidas al efecto deslizamiento, son causadas por la diferencia entre la velocidad de rotación del pulverizador ( $\omega$ ) y la velocidad real de rotación del fertilizante fundido, contenido en su interior ( $\omega_s$ ).



Estas pérdidas, según Steenwinkel, pueden despreciarse, frente a las pérdidas por fricción del orificio, si se realiza un correcto diseño del pulverizador ( $\omega$  y  $\omega_s$  muy similares).

En definitiva, la expresión final a la que se llega es muy similar a la ecuación que permite determinar la velocidad de descarga de un líquido, contenido en un tanque, a través de un orificio :

\* Si  $E_f = 0$   $\xrightarrow{\text{Caso ideal}}$   $v_z = \sqrt{2gz}$

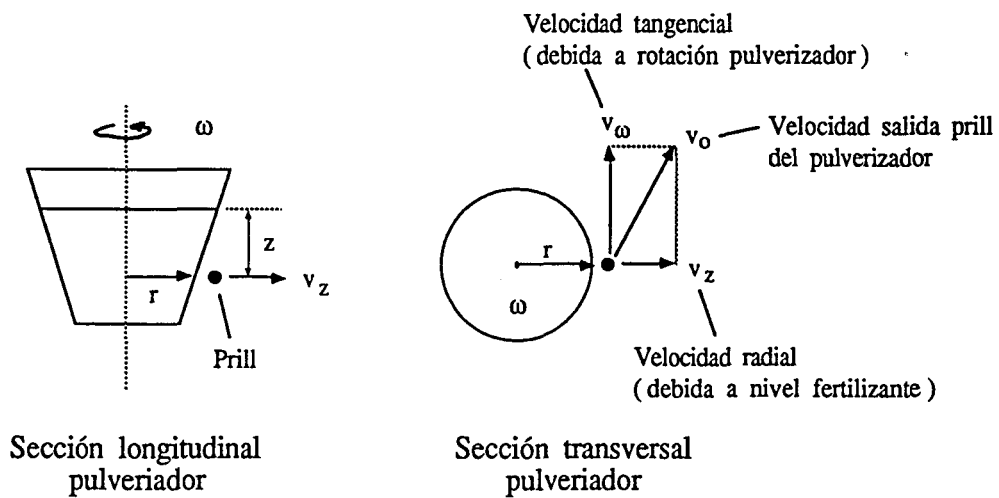
\* Si  $E_f > 0$   $\xrightarrow{\text{Caso real}}$   $v_z = C_D \sqrt{2gz}$  Ec. 3.1

Coeficiente descarga = 0,6 (valor usual)

La velocidad absoluta de salida del prill del pulverizador ( $v_0$ ) es la resultante entre la velocidad radial ( $v_z$ ), debida a la energía potencial del fertilizante, y la velocidad tangencial, debida a la energía cinética de rotación del pulverizador ( $v_\omega$ ), según se resume en la Figura 3.2 adjunta.



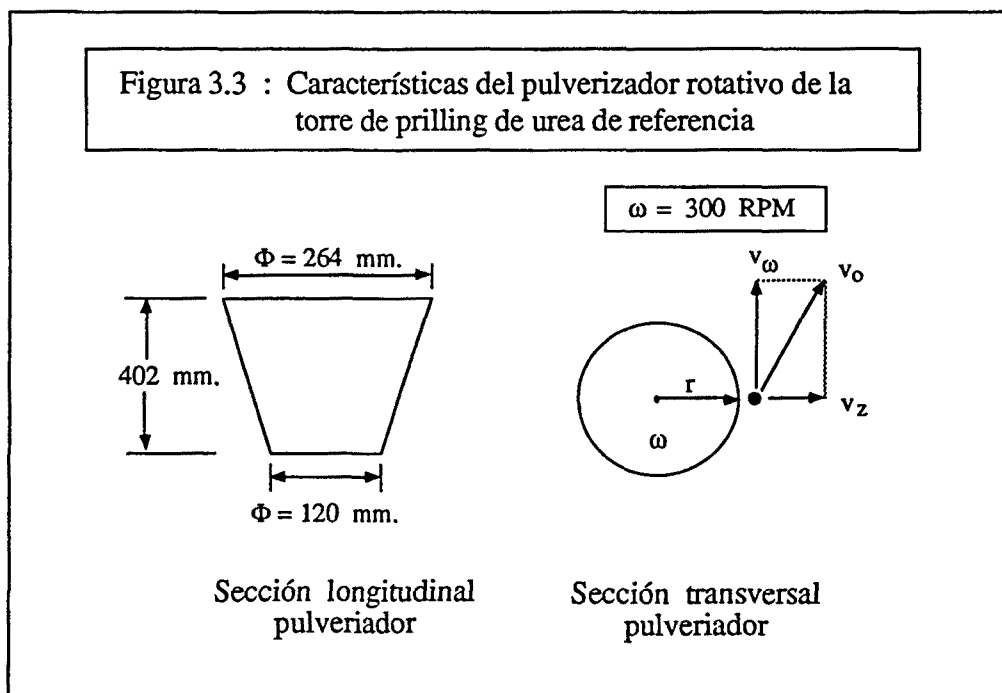
Figura 3.2 : Componentes de la velocidad de salida del prill del pulverizador ( $v_o$ ) (Modelo Steenwinkel)



$v_o = \sqrt{v_z^2 + v_\omega^2}$	Ec. 3.2
$v_z = 0,60 \sqrt{2gz}$	
$v_\omega = \omega r$	

### Estimación de la velocidad inicial de salida del prill en la torre de prilling de urea de referencia.

A partir del modelo físico del pulverizador rotativo de Steenwinkel y de las características físicas y condiciones de operación del pulverizador de la torre de prilling de referencia, se ha realizado una estimación de la velocidad inicial de salida del prill, cuyo proceso de cálculo se resume en la tabla y figuras adjuntas.



**Tabla 3.1 : Estimación de  $v_o$  a diferentes cotas del pulverizador**

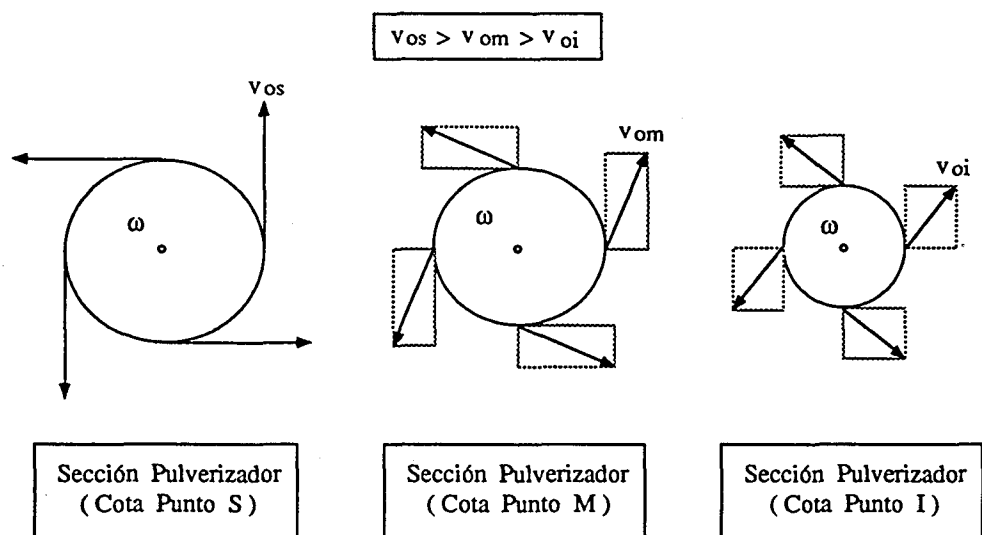
Situación orificio	Cota orificio z (m)	Radio r (m)	$v_\omega$ (m/s)	$v_z$ (m/s)	$v_o$ (m/s)
Punto Superior	0	0,132	4,147	0	4,147
Punto Medio	0,201	0,096	3,016	1,192	3,243
Punto Inferior	0,402	0,060	1,885	1,685	2,528

$v_\omega = \omega r =$  velocidad tangencial ( rotación pulverizador )

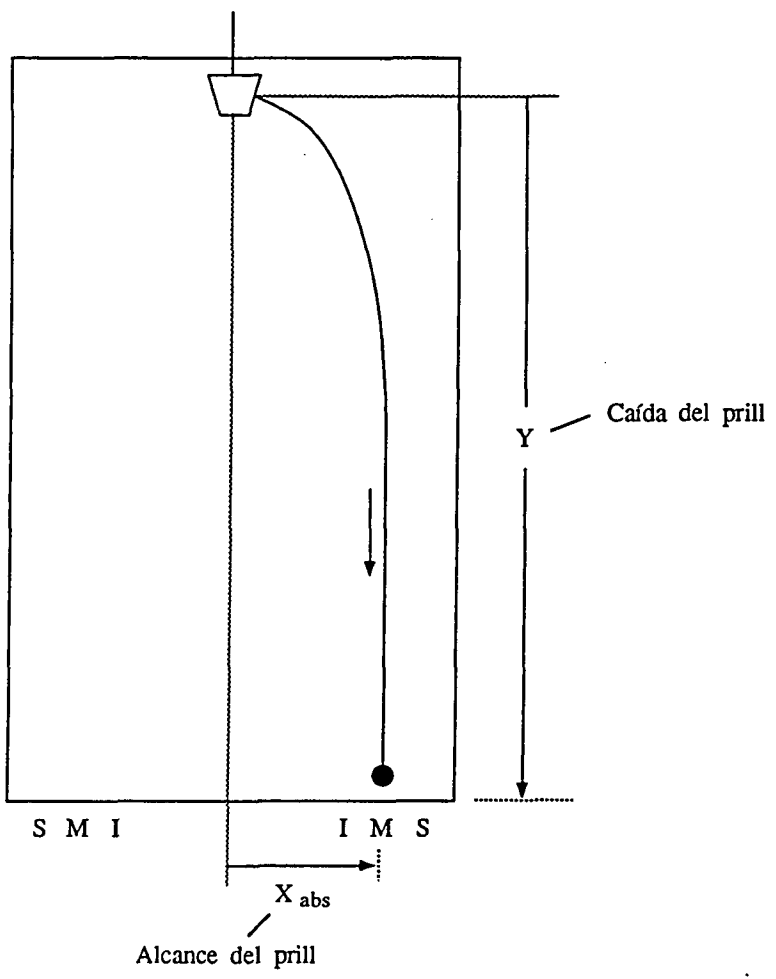
$v_z = 0,60 \sqrt{2 g z} =$  velocidad radial ( nivel de fertilizante ) .

$v_o = \sqrt{v_z^2 + v_\omega^2} =$  velocidad inicial de salida del prill

Fig. 3.4 : Esquema cualitativo de funcionamiento del pulverizador rotativo



Esquema torre de prilling



Constatación previsible :  $t_S > t_M > t_I$   
(t = tiempo residencia prill en torre)

## Conclusiones

El modelo físico de pulverizador de Steenwinkel ha permitido realizar una estimación de la velocidad inicial de salida del pulverizador rotativo de la torre de prilling de urea de referencia.

Los resultados obtenidos, utilizando dicho modelo, permiten deducir las conclusiones previas que a continuación se detallan.

- a) La velocidad de salida del prill del pulverizador ( $v_0$ ) no presenta un valor único, sino que depende de la cota de ubicación del orificio del pulverizador (Tabla 3.1 : Punto S, Punto M y Punto I).

Esta situación permite dar una justificación del porque de la geometría cónica del pulverizador. Con dicha geometría se consigue una buena distribución radial de la lluvia de prills, evitando la subutilización de la sección de la torre, tal como previsiblemente ocurriría en el caso de un pulverizador cilíndrico, por ejemplo.

- b) Los diferentes valores de la velocidad de caída del prill ( $v_0$ ) presuponen, no obstante, que los prills presentarán diferente trayectoria (diferente alcance  $X_{abs}$  y diferente caída  $Y$  / Fig. 3.4), diferente tiempo de residencia y, en consecuencia, diferentes procesos de transmisión de calor con el aire.

Es decir, el perfil de temperaturas y la temperatura superficial final, en la base de la torre, no serán presumiblemente los mismos para todos los prills.

El análisis y metodología de tratamiento de dicha problemática se especifica posteriormente en los apartados 3.3 y 3.4.

### **3.3- ANALISIS DE LA TRAYECTORIA DE CAIDA DEL PRILL.**

#### **3.3.1.- INTRODUCCION.**

En el presente apartado y a partir del modelo físico de pulverizador rotativo ( apartado 3.2 ), se pretende elaborar un modelo de cálculo que permita determinar la evolución de la velocidad y la trayectoria del prill, desde su punto de salida del pulverizador, hasta la base de la torre.

El proceso seguido para desarrollar dicho modelo de cálculo puede resumirse en las siguientes etapas :

- 1) Deducción de las ecuaciones de cálculo que definen la trayectoria del prill.
- 2) Desarrollo de un método de resolución de dichas ecuaciones, que permitan determinar, en todo instante, la posición y la velocidad del prill en la torre.

Tal como se especifica posteriormente ( apartado 3.3.2 ), las ecuaciones de cálculo deducidas no tienen solución analítica conocida, por lo que el método de resolución de dichas ecuaciones será un algoritmo numérico.

Una vez puesto a punto, dicho algoritmo servirá de base para el desarrollo del modelo numérico 2 de cálculo de la torres de prilling ( apartado 3.4 ), juntamente con el algoritmo numérico de transferencia de calor prill-aire, desarrollado en el apartado 2.

### 3.3.2.- ECUACIONES DE CALCULO.

#### Objetivo

Deducir la ecuaciones de cálculo que definen la evolución de la velocidad y la trayectoria del prill en la torre, desde su punto de salida en el pulverizador rotativo, hasta su punto de llegada en la base de la torre.

#### Deducción de las ecuaciones de cálculo

La evolución de la velocidad y la trayectoria del prill en la torre puede determinarse, a partir de la ley de Newton y las expresiones de Lapple [ 24, 25 ], de forma similar a como se hizo en la determinación de la velocidad límite de caída del prill ( apartado 2.2 ).

En el presente caso, no obstante, la trayectoria del prill no será vertical, sino previsiblemente del tipo parabólico.

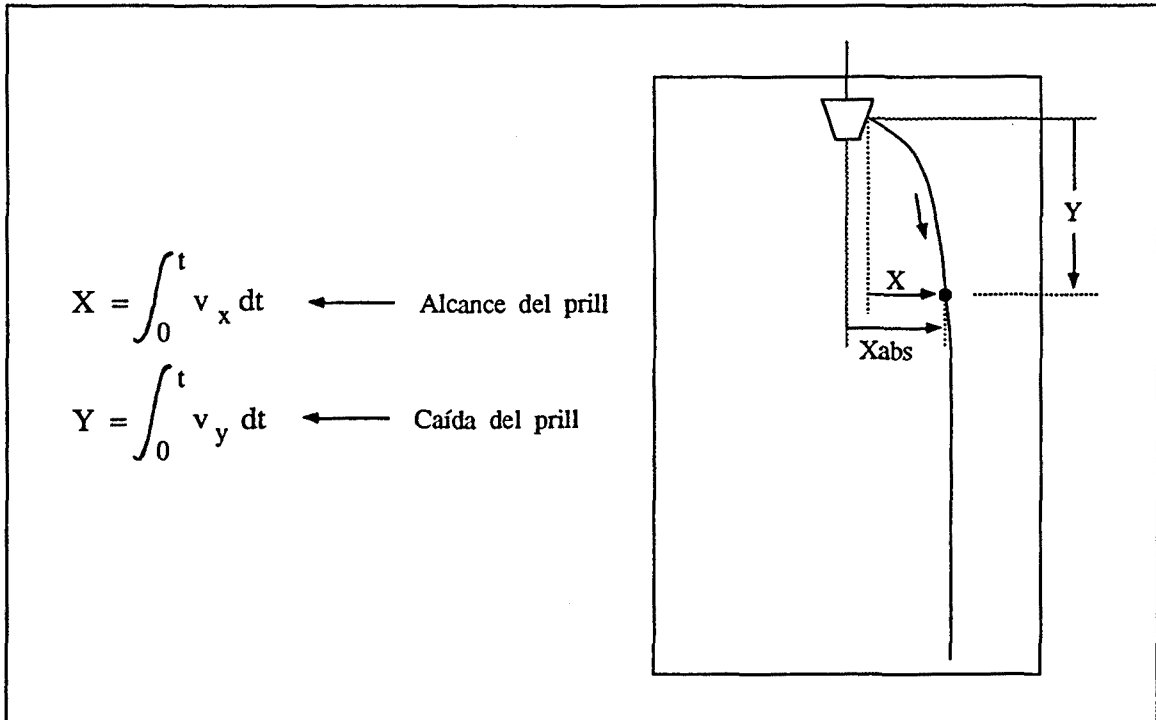
El planteo y deducción de las ecuaciones de cálculo, resultantes de aplicar dicha metodología, se resumen en la Fig.3.5-A y Fig.3.5-B.

#### Conclusiones

De la Fig.3.5-A puede deducirse que la evolución de la velocidad del prill, en función del tiempo, viene determinado por un sistema de 2 ecuaciones diferenciales de primer orden, cuya expresión general se resume como :

$\frac{dv_y}{dt} = f(t, v_y, v_x)$ $\frac{dv_x}{dt} = g(t, v_y, v_x)$	
<p><math>v_p</math> = velocidad absoluta de caída del prill</p> <p><math>v_x</math> = componente horizontal de <math>v_p</math></p> <p><math>v_y</math> = componente vertical de <math>v_p</math></p> <p><math>t</math> = tiempo</p>	

A partir de los valores de  $v_x$  y  $v_y$ , obtenidos en la resolución del sistema de ecuaciones diferenciales anterior, podrá determinarse la evolución de la trayectoria del prill, mediante las ecuaciones de cálculo que se resumen en el cuadro adjunto.



Hipótesis de cálculo :  $X_{abs} \approx X$

- \*  $X$  = Alcance del prill = Distancia horizontal, entre el punto de salida del prill del pulverizador y la posición del prill en la torre, en un instante dado.
- \*  $X_{abs}$  = Alcance absoluto del prill = Distancia horizontal, entre el centro de la torre y la posición del prill en la torre, en un instante dado.
- \*  $X_{abs} = X + \text{Radio pulverizador}$
- \* A causa del pequeño valor relativo del radio del pulverizador, respecto a  $X$ , puede aceptarse que :  $X_{abs} \approx X$

Como conclusión final a este apartado, debe indicarse que el sistema de ecuaciones diferenciales, que definen la velocidad del prill, no tiene solución analítica, por lo que, tanto dicho sistema de ecuaciones, como las ecuaciones de cálculo de la trayectoria del prill, deben resolverse mediante un método numérico, el cual se desarrolla en el apartado 3.3.3.

Figura 3.5-A : Ecuaciones de cálculo para determinar la evolución de la velocidad y la trayectoria del prill en la torre ( 1º Parte : Planteo de ecuaciones básicas )

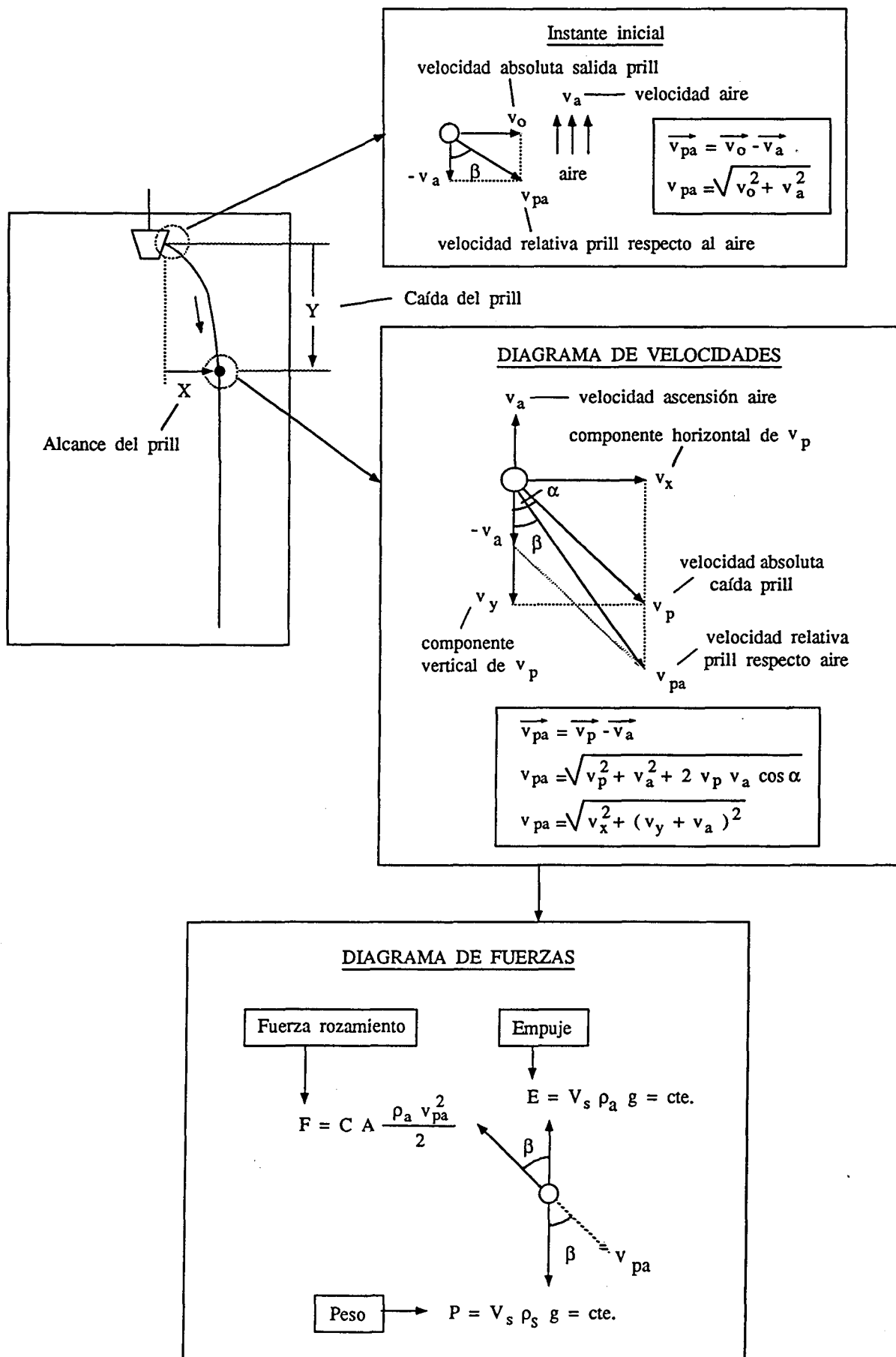
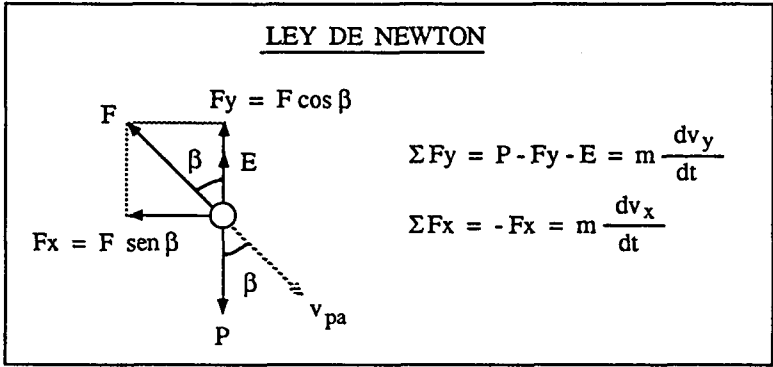




Figura 3.5-B : Ecuaciones de cálculo para determinar la evolución de la velocidad y la trayectoria del prill en la torre ( 2º Parte : Deducción de ecuaciones finales )



ESPECIFICACIONES

1) Análisis funcional de Fy

$$F_y = F \cos \beta = C A \frac{\rho_a v_{pa}^2}{2} \cos \beta$$

$$v_{pa} = \sqrt{v_x^2 + (v_y + v_a)^2} = f(v_x, v_y)$$

$$\cos \beta = \frac{v_y + v_a}{v_{pa}} = f(v_x, v_y)$$

$$C \begin{cases} C = 24 / Re & Re < 2 \\ C = 18,5 / (Re)^{3/5} & 2 < Re < 500 \\ C = 0,44 & 500 < Re < 200.000 \end{cases}$$

Ecuaciones de Lapple

$$C = f(v_x, v_y)$$

$$Re = \frac{\rho_a v_{pa}^2 D_s}{\mu} = f(v_x, v_y)$$

Conclusión :  $F_y = f(v_x, v_y)$

2) Análisis funcional de Fx

$$F_x = F \text{ sen } \alpha$$

De forma similar a Fy → Conclusión :  $F_x = g(v_x, v_y)$

A) SISTEMA DE ECUACIONES DIFERENCIALES QUE DEFINEN LA VELOCIDAD DEL PRILL

$$\frac{dv_y}{dt} = \frac{\Sigma F_y}{m} = \frac{P - F_y - E}{m} = f(t, v_x, v_y)$$

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{\Sigma F_x}{m} = \frac{-F_x}{m} = g(t, v_x, v_y)$$

B) ECUACIONES DE CALCULO QUE DEFINEN LA TRAYECTORIA DEL PRILL

$$Y = \int_0^t v_y dt \quad \leftarrow \text{Caída del prill}$$

$$X = \int_0^t v_x dt \quad \leftarrow \text{Alcance del prill}$$

### 3.3.3.- METODO NUMERICO DE RESOLUCION ( PROGRAMA TRAJ ).

#### Objetivo

En el presente apartado, se describe el método numérico de resolución de las ecuaciones de cálculo que definen la evolución de la velocidad y la trayectoria del prill en la torre, deducidas en el apartado 3.3.2.

ECUACIONES DE CALCULO	METODO NUMERICO DE RESOLUCION
<p>* <u>Velocidad del prill</u></p> $\frac{dv_y}{dt} = f(t, v_y, v_x)$ $\frac{dv_x}{dt} = g(t, v_y, v_x)$	<p>Runge - Kutta 4º orden [ 39 ]</p>
<p>* <u>Trayectoria del prill</u></p> $Y = \int_0^t v_y dt$ $X = \int_0^t v_x dt$	<p>Crank - Nicholson [ 33 ]</p>

#### Método de Runge-Kutta de 4º orden ( velocidad del prill )

El método de Runge-Kutta es un método numérico convencional, de contrastada fiabilidad, que permite la resolución de sistema de ecuaciones diferenciales lineales, sin solución analítica, como en el presente caso ( variables no separables ).

En la figura 3.6 adjunta, se resume el algoritmo numérico de cálculo, correspondiente a dicho método, aplicado a nuestro sistema de ecuaciones diferenciales.

Figura 3.6 : Algoritmo numérico de cálculo de la velocidad del prill ( Método Runge-Kutta 4º orden )

Sistema de ecuaciones diferenciales a resolver

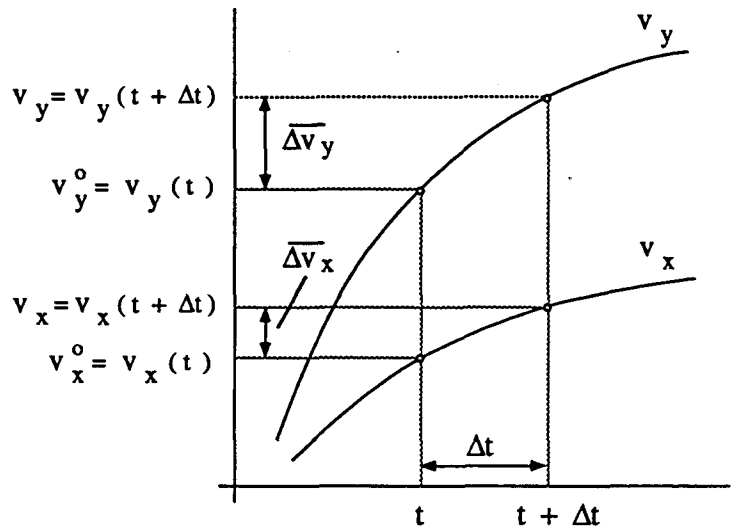
$$\frac{dv_y}{dt} = f(t, v_y, v_x)$$

$$\frac{dv_x}{dt} = g(t, v_y, v_x)$$

Condiciones iniciales

$$t=0 \rightarrow \begin{cases} v_x^0 = \text{dato} \\ v_y^0 = 0 \end{cases}$$

Representación cualitativa



Algoritmo numérico de Runge-Kutta

$$v_y(t + \Delta t) = v_y(t) + \overline{\Delta v}_y$$

$$v_x(t + \Delta t) = v_x(t) + \overline{\Delta v}_x$$

$$\overline{\Delta v}_x = \frac{l}{6} = \frac{l_1 + 2l_2 + 2l_3 + l_4}{6}$$

$$\overline{\Delta v}_y = \frac{k}{6} = \frac{k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4}{6}$$

$$k_1 = \Delta t f(t, v_y^0, v_x^0)$$

$$l_1 = \Delta t g(t, v_y^0, v_x^0)$$


---


$$k_2 = \Delta t f(t + \Delta t/2, v_y^0 + K_1/2, v_x^0 + l_1/2)$$

$$l_2 = \Delta t g(t + \Delta t/2, v_y^0 + K_1/2, v_x^0 + l_1/2)$$


---


$$k_3 = \Delta t f(t + \Delta t/2, v_y^0 + K_2/2, v_x^0 + l_2/2)$$

$$l_3 = \Delta t g(t + \Delta t/2, v_y^0 + K_2/2, v_x^0 + l_2/2)$$


---

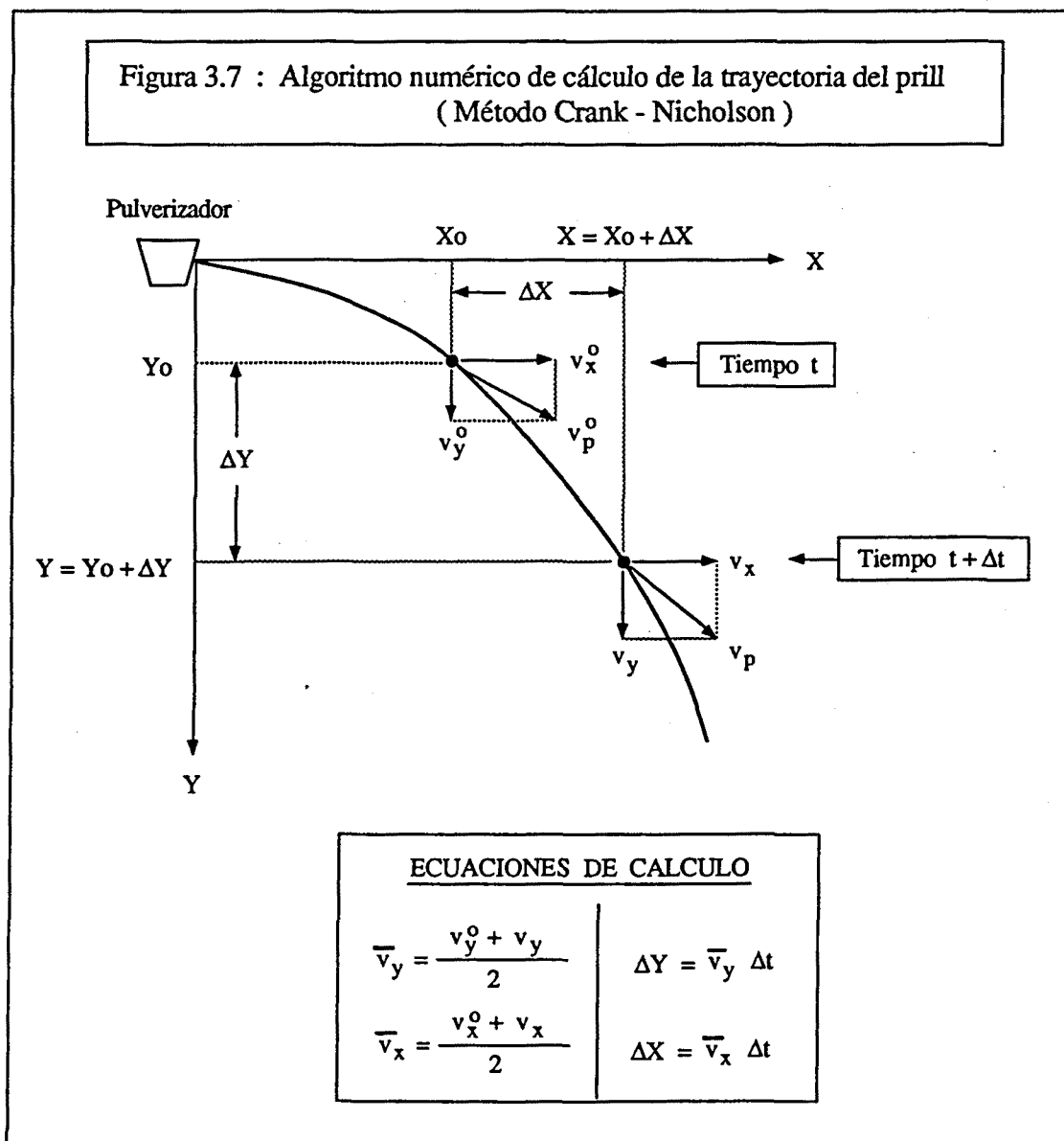

$$k_4 = \Delta t f(t + \Delta t, v_y^0 + K_3, v_x^0 + l_3)$$

$$l_4 = \Delta t g(t + \Delta t, v_y^0 + K_3, v_x^0 + l_3)$$

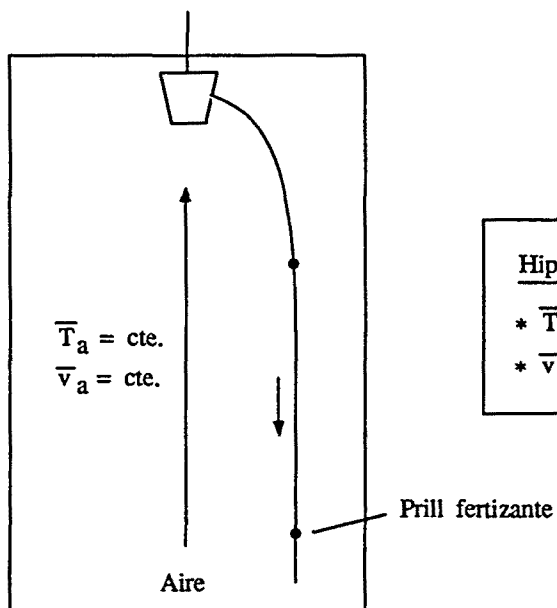
### Método de Crank - Nicholson ( Trayectoria del prill )

A partir de los valores de la velocidad del prill en el instante  $t$  y en el instante  $t + \Delta t$  (calculados por el método de Runge - Kutta ), puede determinarse la evolución de la trayectoria o posición del prill, utilizando el valor promedio de dichos valores en el intervalo  $\Delta t$ .

En definitiva se está utilizando un método de integración tipo Crank-Nicholson [ 33 ], cuyo algoritmo de cálculo se resume en la Figura 3.7.



Organigrama de cálculo del algoritmo numérico conjunto ( Programa TRAJ )



Hipótesis de cálculo :

- \*  $\bar{T}_a$  = Temp. aire en la torre = cte.
- \*  $\bar{v}_a$  = Velocidad aire en la torre = cte.

Datos del proceso

$D_p$  = Diámetro prill  
 $v_o$  = velocidad inicial salida prill  
 $H$  = Altura o caída total del prill  
 $R_p$  = Radio pulverizador en punto salida prill  
 $\bar{T}_a$  = Temperatura media aire en torre  
 $\bar{v}_a$  = Velocidad media ascensión aire

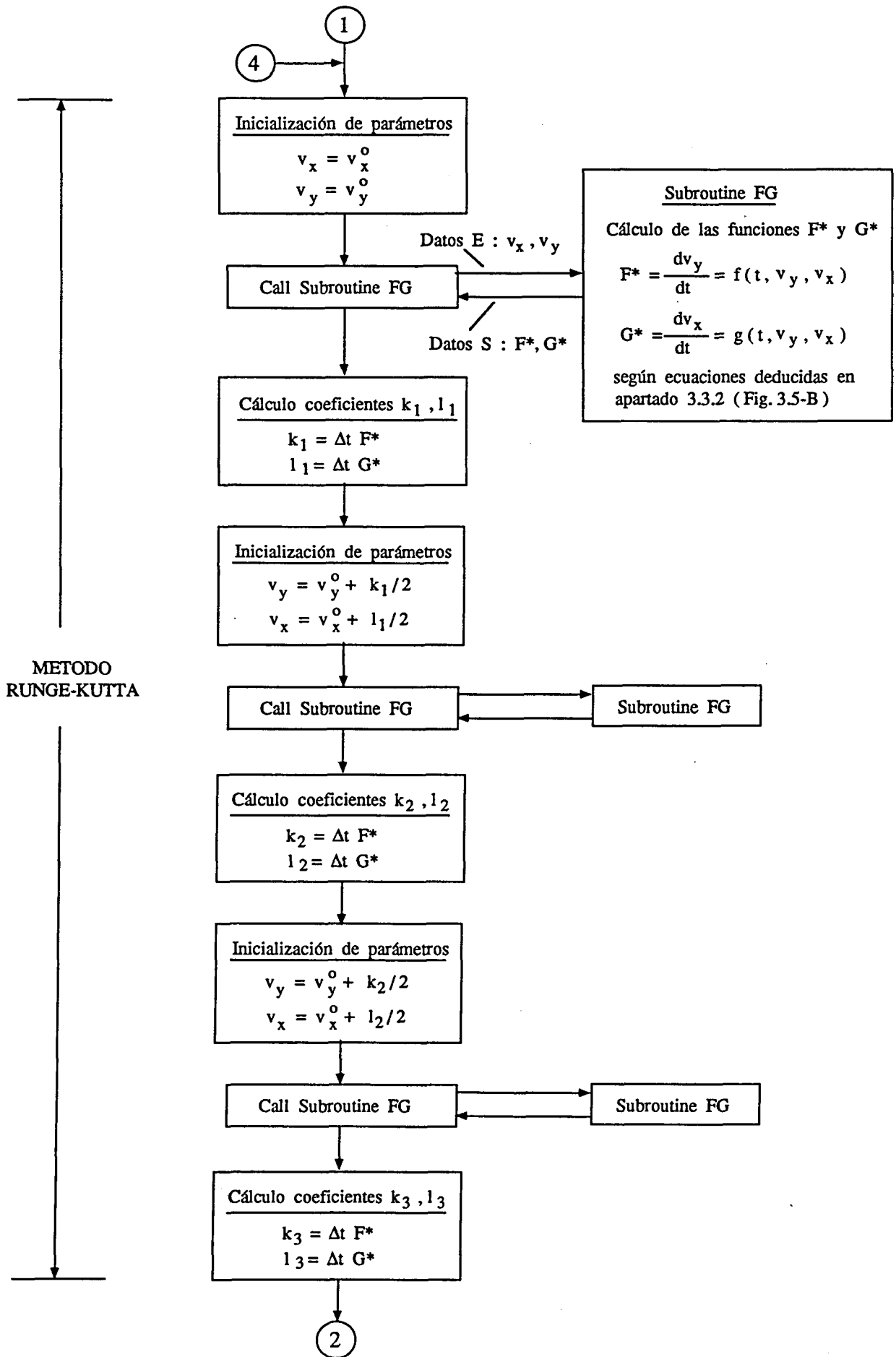
Datos método numérico

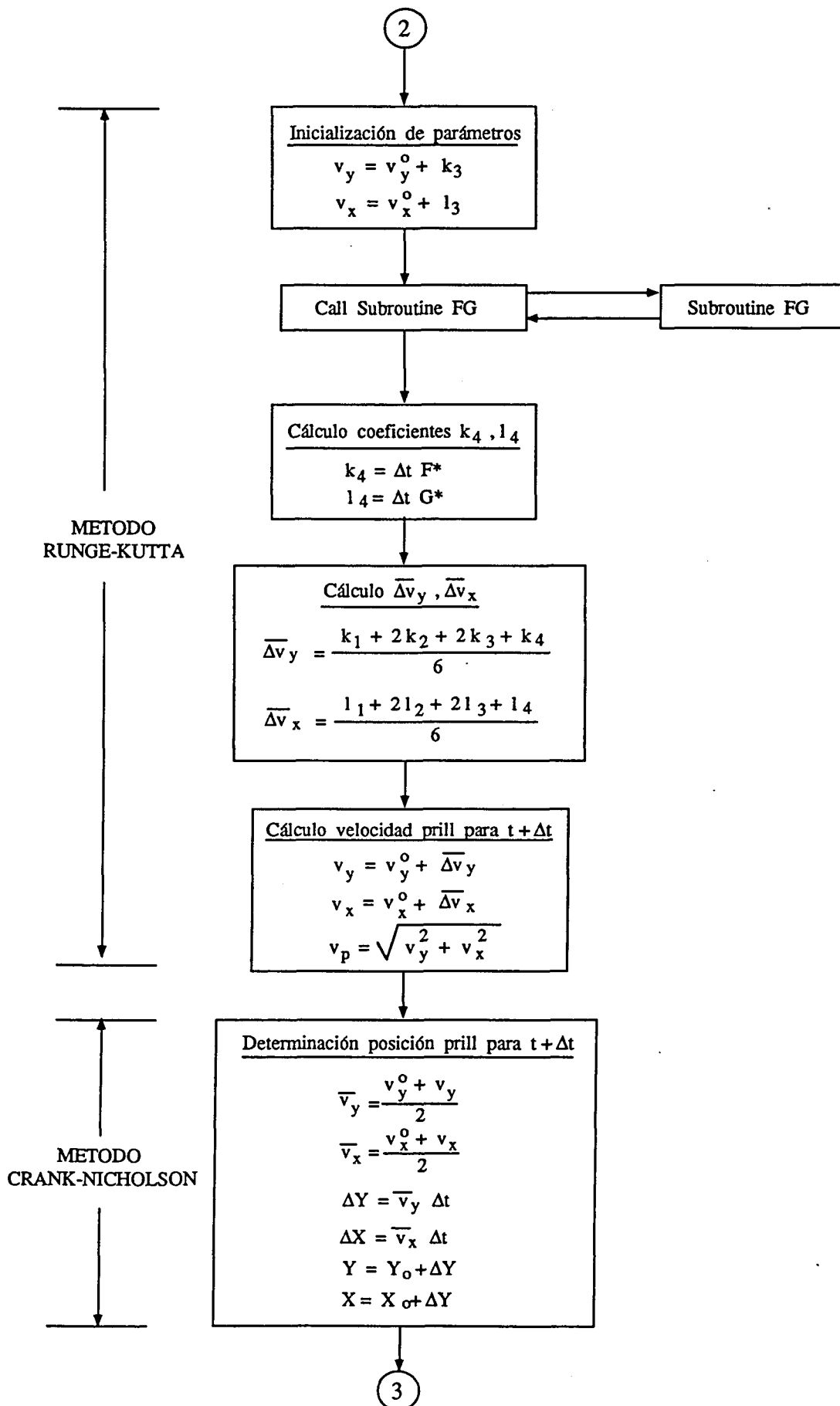
$\Delta t$  = Incremento tiempo cálculo

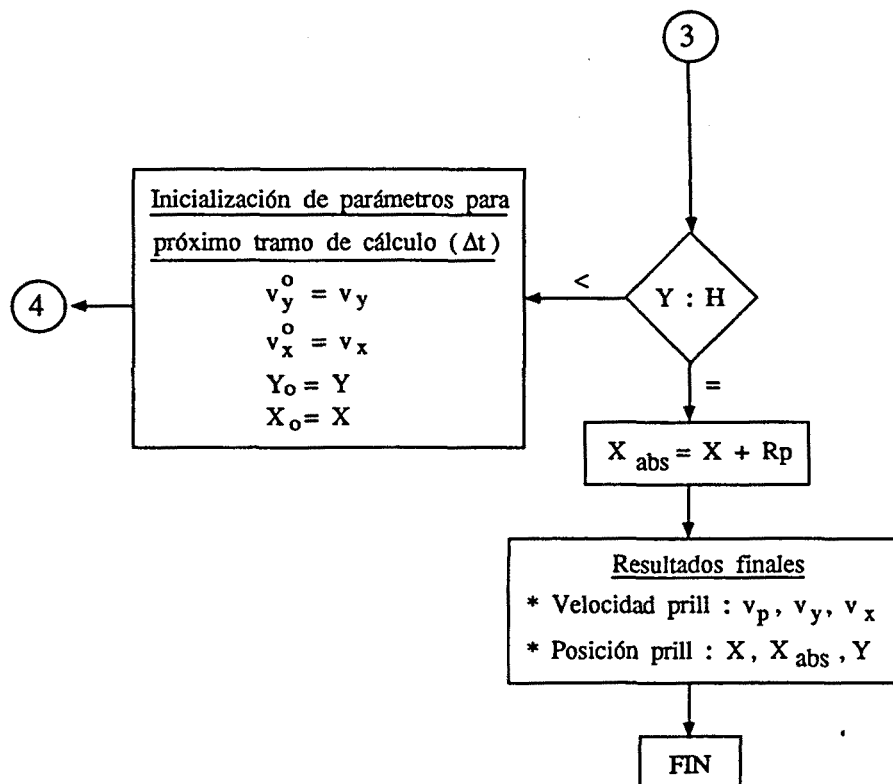
Parámetros iniciales

$v_x^o = v_o$   
 $v_y^o = 0$   
 $X_o = 0$   
 $Y_o = 0$

1









### 3.3.4.- RESULTADOS PRELIMINARES. CONCLUSIONES.

En el presente apartado se resume el proceso de puesta a punto y análisis de resultados del modelo numérico desarrollado en el apartado 3.3.3 ( Programa TRAJ ), que permite determinar la evolución de la velocidad y trayectoria del prill en la torre.

Para conseguir dichos objetivos, se ha decidido aplicar el modelo numérico para unas condiciones de operación similares a los de la torre de prilling de urea de referencia (cf.apartado 1.4 , apartado 3.2).

Con este enfoque se pretende, no solamente realizar un análisis de convergencia del modelo numérico, sino adicionalmente obtener una información previa importante sobre el funcionamiento dinámico del pulverizador y sobre las posibles incompatibilidades entre los dos algoritmos básicos de cálculo, que configuran el modelo numérico 2 de cálculo de torres de prilling : algoritmo numérico de trayectoria y algoritmo numérico de transmisión de calor.

En las Tablas 3.2-A, 3.2-B y 3.2-C, se resumen los resultados de cálculo del programa TRAJ, utilizando las condiciones de operación indicadas.

#### Conclusiones

- 1) Se ha estudiado la evolución de la velocidad y trayectoria para varios diámetros de prill (de 1 a 4 mm., Tabla 3.2-B), deduciendo, en todos los casos, que el método numérico presenta una convergencia aceptable para el mismo incremento de tiempo de cálculo :  $\Delta t \leq 0,01$  s.

Esta es una conclusión importante, de cara a la compatibilidad entre algoritmos de cálculo.

En relación a este punto, debe recordarse que los  $\Delta t$  del algoritmo numérico de transmisión de calor, deducidos en el apartado 2.6.4.2, son inferiores o iguales a dicho valor :

Sección 1 :  $\Delta t_L = 0,0005$  s  
 Sección 2 :  $\Delta t_A = \Delta t_B = 0,01$  s  
 Sección 3 :  $\Delta t_S = 0,01$  s

En principio, pues, puede preverse que los  $\Delta t$ , utilizados para el proceso de transferencia de calor, pueden ser asimismo utilizables para la determinación de la velocidad y trayectoria del prill.

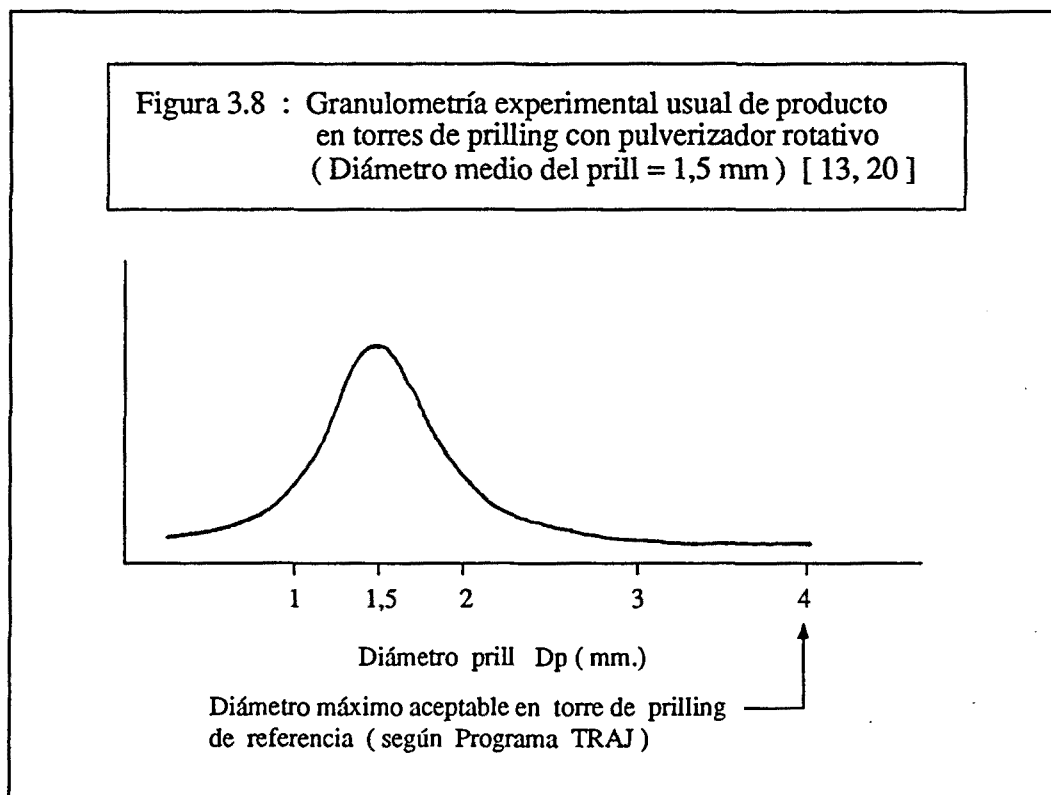
- 2) De la Tabla 3.2-B, puede deducirse que el parámetro básico que fija el tiempo de residencia del prill es su diámetro  $D_p$ , y no su velocidad inicial de salida del pulverizador.

En este sentido, para un mismo diámetro del prill, la diferencia de tiempos de residencia, para los tres puntos analizados ( S, M, I ) es mínima ( 1% aproximadamente ), aunque, lógicamente, el prill con mayor velocidad inicial y mayor caída ( Punto S,  $v_0 = 4,15$  m/s,  $Y = H = 33,9$  m ) es el que emplea más tiempo, en llegar a la base de la torre.

Posteriormente deberá verificarse si esta diferencia de tiempos, aunque pequeña, puede ser significativa, de cara a la transmisión de calor del prill ( cf. tabla 3.3, p. 3-37 ).

- 3) La diferencia notable de alcance de prill ( $X_{ABS}$ ) demuestra el buen grado de distribución radial de lluvia de prills, que se consigue con el pulverizador rotativo.

Según las referencias experimentales [ 13, 20 ], en una torre de producción de prills de fertilizante de diámetro medio 1,5 mm, la granulometría del producto obtenido, en la base de la torre, presenta una distribución normal entre 1 y 2 mm, con media en 1,5 mm ( cf. Figura 3.8 ).



Aceptando esta granulometría para nuestra torre de prilling de referencia, el modelo numérico permite predecir que dicha torre es capaz de tratar la fracción de prills, generados en el pulverizador, desde 1 a 4 mm de diámetro, sin producirse pérdida de producto, por impacto del prill en las paredes de la torre, en su trayectoria de descenso. ( Radio torre = 6,2 m, Alcance máximo del prill 4 mm = 6,34 , cf. Tabla 3.2-B ).

- 4) En la Tabla 3.2-C, se resume la evolución de la velocidad y trayectoria del prill, para el caso que, presumiblemente, será más representativo del proceso de la torre de prilling de referencia :  $D_p = 1,5$  mm, Punto M del pulverizador,  $v_o = 3,24$  m / s.

De dicha tabla puede deducirse que el prill emplea aproximadamente un tiempo de 2 segundos en alcanzar el 99% de su velocidad final ( $v_p$ ).

Es decir la etapa de transición del prill, desde su salida del pulverizador, hasta alcanzar un régimen de velocidad prácticamente estacionario, supone el siguiente porcentaje de tiempo y altura, respecto a los valores totales :

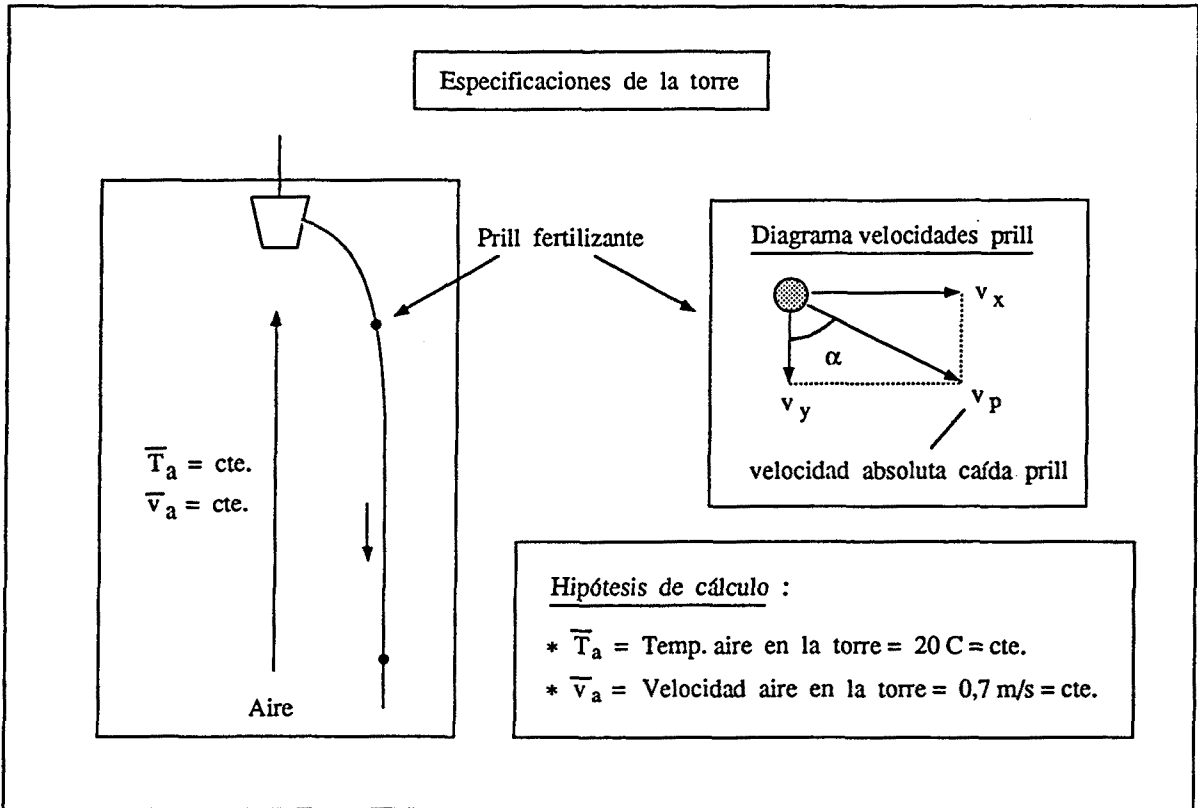
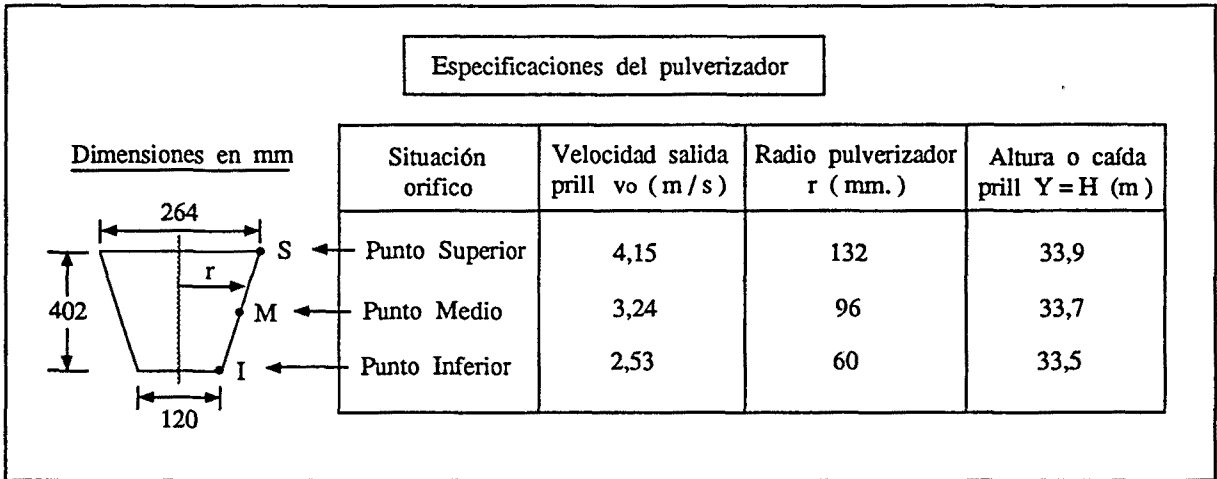
$$\% \text{ tiempo} = \frac{2}{5,826} = 34,3 \%$$

$$\% \text{ altura} = \frac{9,515}{33,7} = 28,2 \%$$

Esta situación permite constatar que el régimen transitorio, en cuanto a velocidad y trayectoria del prill, es significativo, respecto al proceso global de la torre.

- 5) Finalmente, debe indicarse que el algoritmo numérico desarrollado ( Programa TRAJ ) será, no solamente utilizado en el modelo numérico 2 de cálculo y simulación de torres de prilling ( apartados 3.4 y 3.5 ), sino también en el análisis de los métodos analíticos de cálculo de torres ( capítulo 5 ).

Tabla 3.2-A : Modelo numérico de trayectoria del prill.  
Especificaciones y condiciones de operación utilizadas



**TABLA 3.2-B : RESULTADOS FINALES DEL MODELO NUMERICO DE CALCULO  
(PROGRAMA TRAJ)**

Dp [mm]	Punto	vo [m/s]	$\Delta t$ [s]	t [s]	XABS [m]	Y [m]	vx [m/s]	vy [m/s]	vp [m/s]	$\alpha$
1	S	4,15	0,01	8,144	2,218	33,9	6,221 e-7	4,379	4,379	7,986 e-7
	M	3,24	0,01	8,097	1,751	33,7	5,491 e-8	4,379	4,379	6,750 e-7
	I	2,53	0,01	8,051	1,365	33,5	4,797 e-8	4,379	4,379	6,037 e-7
1,5	S	4,15	0,01	5,862	3,547	33,9	7,29 e-4	6,327	6,327	6,602 e-3
	M	3,24	0,01	5,826	2,801	33,7	6,139 e-4	6,327	6,327	5,559 e-3
	I	2,53	0,01	5,791	2,191	33,5	5,113 e-4	6,327	6,327	4,630 e-3
2	S	4,15	0,01	5,150	4,340	33,9	7,534 e-3	7,414	7,414	5,823 e-2
	M	3,24	0,01	5,114	3,467	33,7	6,372 e-3	7,414	7,414	4,925 e-2
	I	2,53	0,01	5,082	2,724	33,5	5,277 e-3	7,414	7,414	4,078 e-2
3	S	4,15	0,01	4,375	5,477	33,9	6,828 e-2	9,233	9,234	0,424
	M	3,24	0,01	4,345	4,373	33,7	5,677 e-2	9,234	9,234	0,352
	I	2,53	0,01	4,317	3,457	33,5	4,661 e-2	9,234	9,234	0,289
4	S	4,15	0,01	3,958	6,341	33,9	0,198	10,746	10,748	1,055
	M	3,24	0,01	3,931	5,043	33,7	0,163	10,747	10,748	0,866
	I	2,53	0,01	3,907	3,976	33,5	0,132	10,747	10,748	0,704

**NOTACION**

- Dp = Diámetro prill  
vo = Velocidad inicial salida prill  
 $\Delta t$  = Incremento tiempo de cálculo (método numérico)  
t = Tiempo residencia prill en torre  
XABS = Alcance prill (desde centro torre)  
Y = Altura o caída del prill  
vp = Velocidad absoluta final de caída del prill ( base de la torre )  
vx = Componente horizontal de vp  
vy = Componente vertical de vp  
 $\alpha$  = Angulo de vp respecto a la vertical

**TABLA 3.2-C : RESULTADOS PARCIALES DEL MODELO NUMERICO DE CALCULO:  
EVOLUCION DE LA VELOCIDAD Y TRAYECTORIA DEL PRILL CON EL TIEMPO**

Caso a estudio: Dp [mm] = 1,5 Punto pulverizador : M vo [m/s] = 3,24 Δ t [s] = 0,01					
t (s)	XABS (m)	Y (m)	vp (m/s)	α	
0	0,096	0	3,240	90	
0,5	1,385	1,042	4,275	27,25	
1	2,115	3,459	5,659	10,46	
1,5	2,481	6,409	6,140	4,60	
2	2,653	9,515	6,277	2,09	
2,5	2,733	12,664	6,314	0,96	← 99% velocidad final vp
3	2,770	15,823	6,324	0,44	
3,5	2,787	18,986	6,326	0,20	
4	2,794	22,150	6,327	0,09	
4,5	2,798	25,313	6,327	0,04	
5	2,800	28,476	6,327	0,02	
5,5	2,801	31,640	6,327	0,009	
5,826	2,801	33,700	6,327	0,006	

### **3.4.- MODELO NUMERICO 2 DE CALCULO DE TORRES DE PRILLING ( PROGRAMA TP2C ).**

#### **3.4.1.- DESARROLLO DEL ALGORITMO DE CALCULO.**

##### **3.4.1.1.- Introducción.**

En el presente apartado se resume el desarrollo del algoritmo general de cálculo de torres de prilling, correspondiente al modelo numérico 2 ( torres con pulverizador rotativo ).

Tal como se ha indicado previamente, dicho algoritmo está compuesto por dos bloques integrados :

1) Algoritmo numérico de transmisión de calor prill-aire

Dicho algoritmo es muy similar al desarrollado para el modelo numérico 1 ( Torres de prilling con pulverizador estático ).

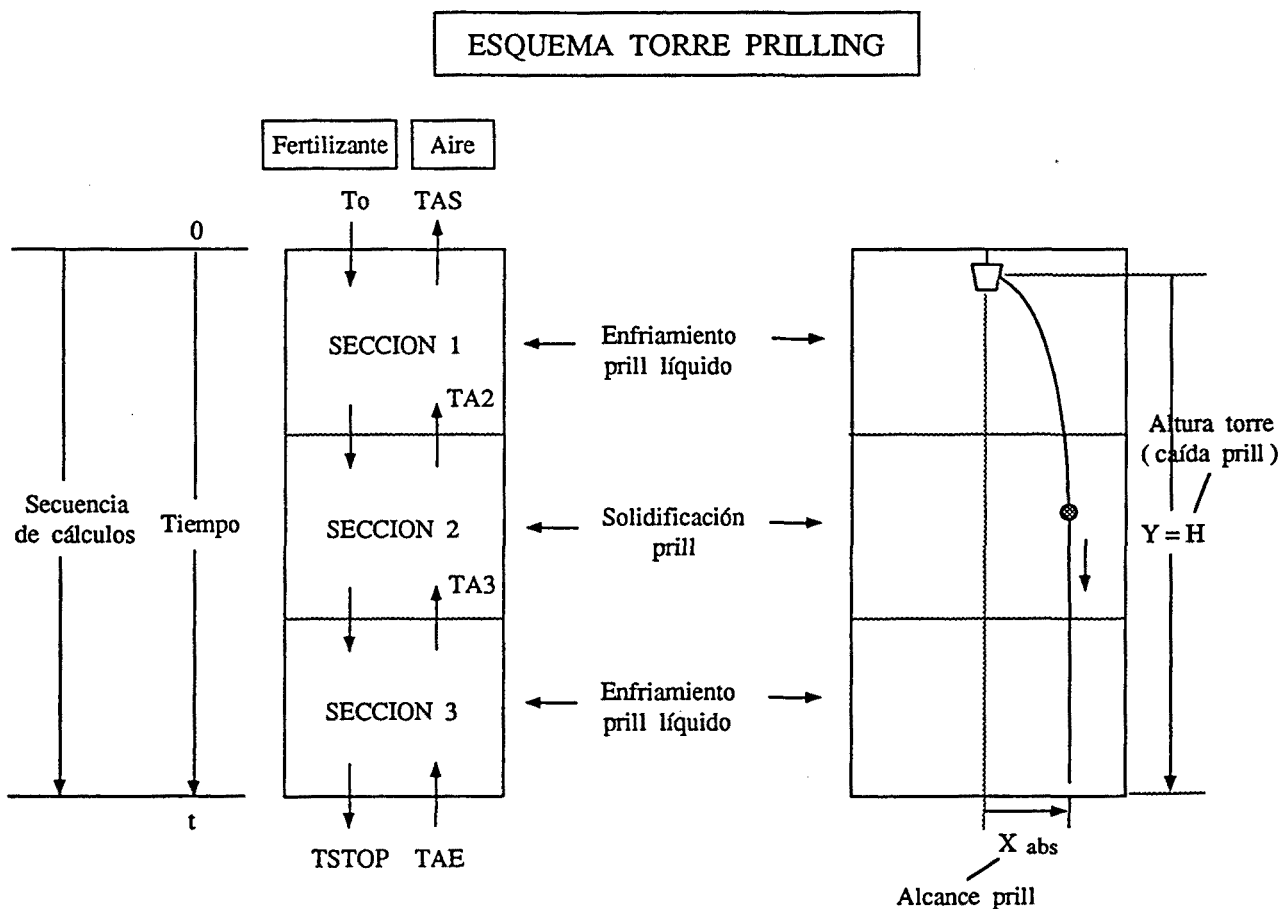
2) Algoritmo numérico de trayectoria del prill

Corresponde al algoritmo desarrollado en los apartados 3.2 y 3.3, a fin de poder determinar la velocidad y posición del prill en la torre, en todo instante, condición indispensable para poder analizar una torre con pulverizador rotativo.

A la vista de que gran parte de la estructura del programa de cálculo es similar al programa TP1 ( algoritmo numérico de transmisión de calor ) y con la finalidad de no realizar una exposición excesivamente repetitiva, se ha decidido resumir el desarrollo realizado, indicando el organigrama general del programa TP2C.

Todas las hipótesis de cálculo ( algunas de ellas diferentes respecto al programa TP1 ) y detalles de integración de ambos algoritmos numéricos ( transmisión de calor, trayectoria del prill ) quedan suficientemente especificados en los organigramas indicados.

## 3.4.1.2.- Organigrama general del algoritmo de cálculo.

**HIPOTESIS BASICAS DE CALCULO**

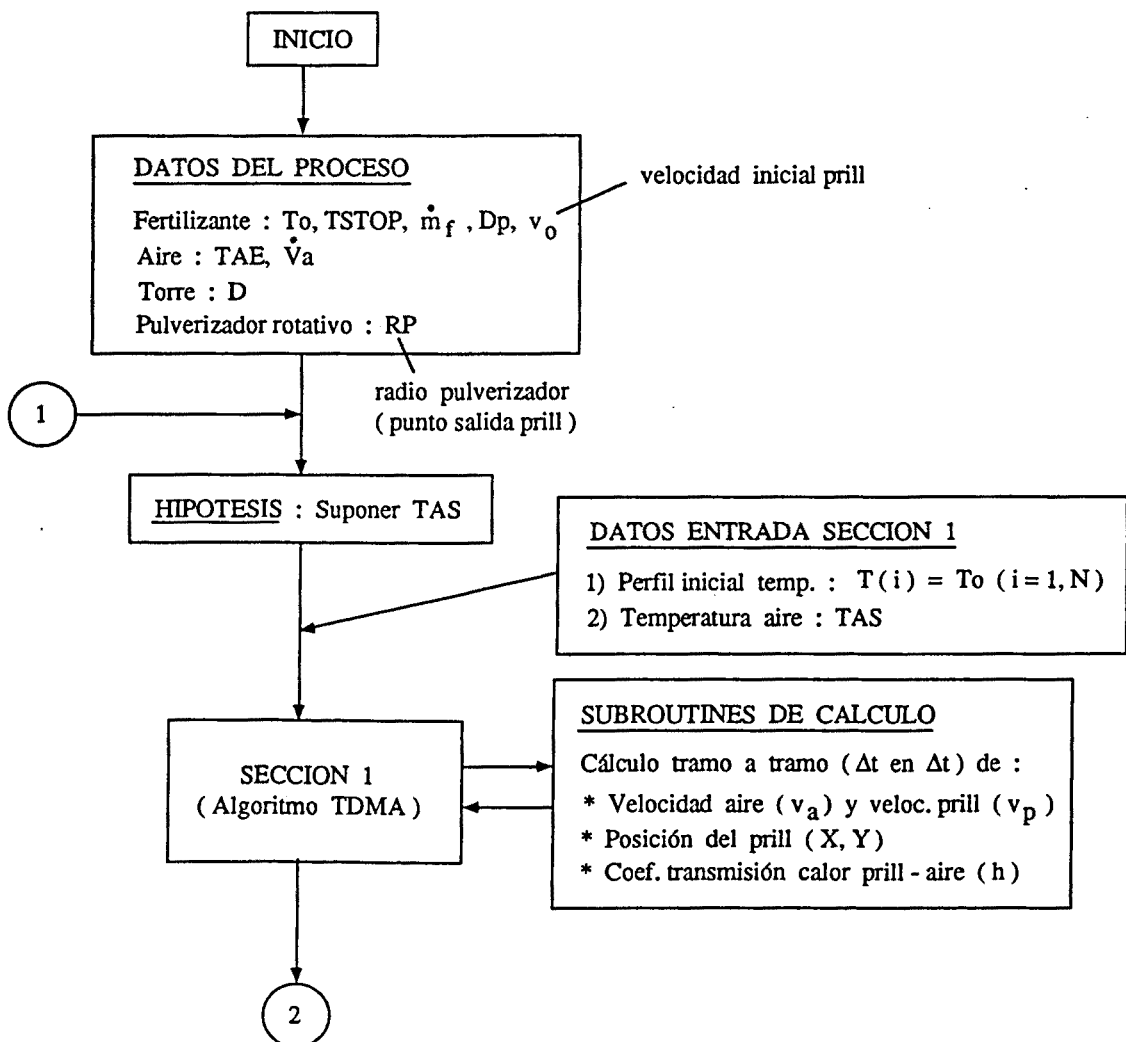
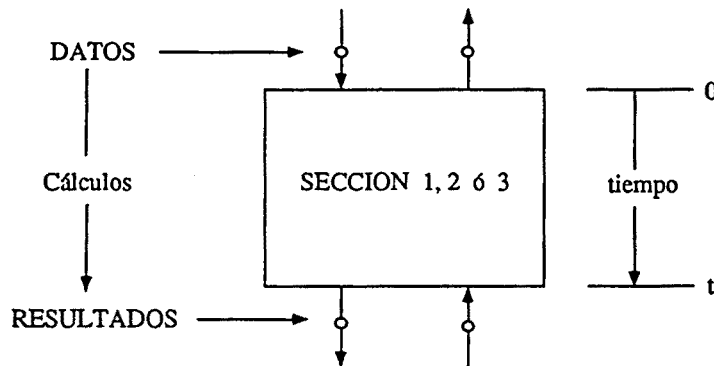
Símbolo	Variable	Hipótesis	Temperatura de cálculo de la variable
$v_a$	Velocidad ascensión aire	Valor variable (Cálculo tramo a tramo $\Delta t$ )	Temperatura media del aire para cada $\Delta t$ de cálculo
$v_p$	Velocidad absoluta caída prill	Valor variable (Cálculo tramo a tramo $\Delta t$ )	Temperatura media del aire para cada $\Delta t$ de cálculo
$h$	Coficiente transmisión calor por convección prill - aire	Valor variable (Cálculo tramo a tramo $\Delta t$ )	$T_{film} = \frac{T_p + T_a}{2}$ <p><math>T_p</math> : Temp. superficial prill  <math>T_a</math> : Temperatura media aire en el <math>\Delta t</math> de cálculo</p>

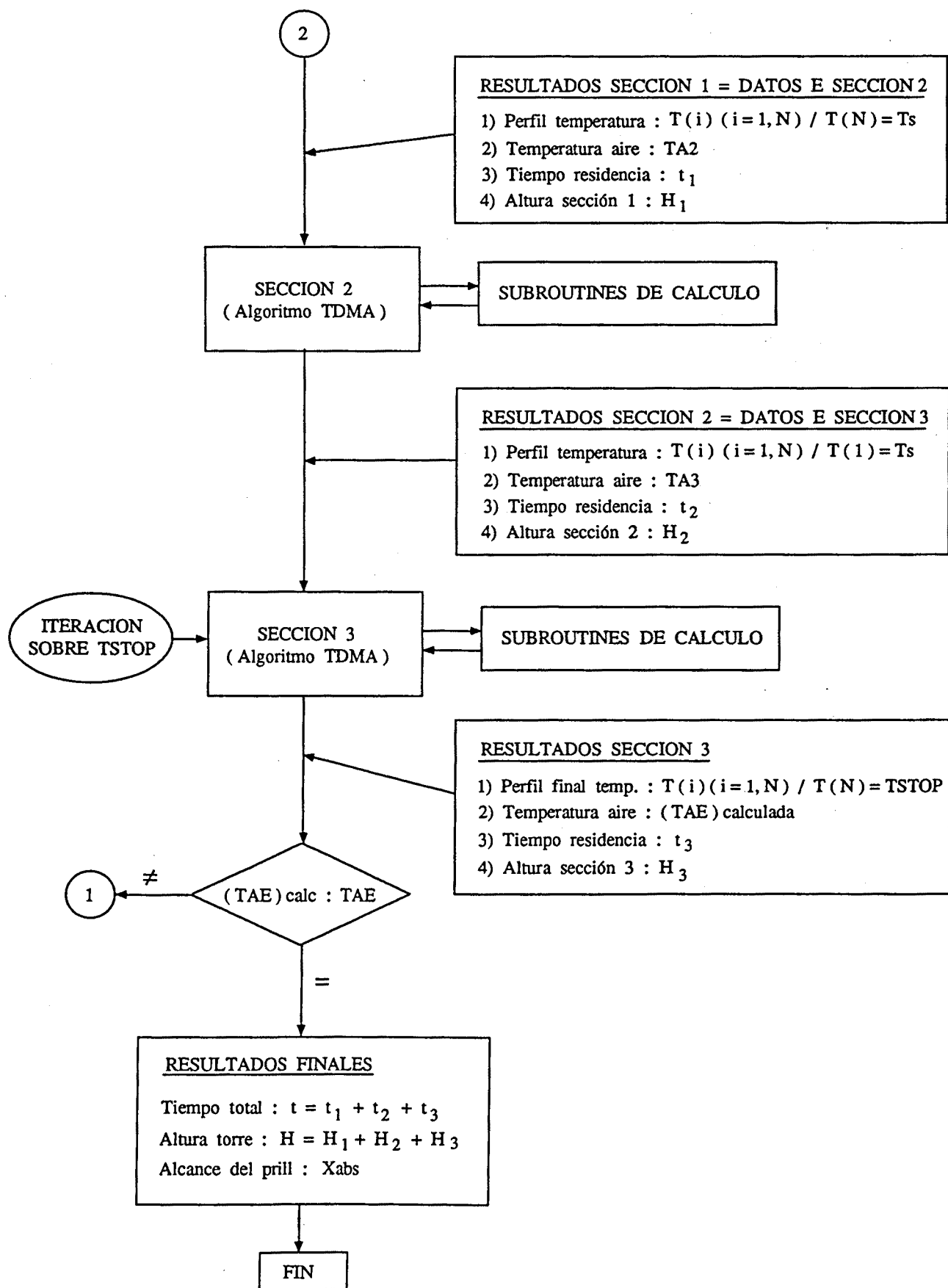


## ORGANIGRAMA GENERAL DEL ALGORITMO DE CALCULO

Siguiendo el modelo físico de torre de prilling, dividida en 3 secciones, el proceso de cálculo persigue determinar básicamente :

- 1) Perfil de temperatura del prill a la salida de cada sección.
- 2) Temperatura del aire a la entrada de cada sección
- 3) Tiempo de residencia del prill en cada sección :  $t_1$  ,  $t_2$  y  $t_3$
- 4) Altura de cada sección de la torre :  $H_1$  ,  $H_2$  y  $H_3$





### 3.4.2.- PUESTA A PUNTO DEL ALGORITMO DE CALCULO.

La puesta a punto del algoritmo conjunto de cálculo de torres de prilling tipo 2, se ha realizado de forma similar a como se hizo para el algoritmo de cálculo tipo 1 ( cf. apartado 2.6 ), utilizando gran parte de la información deducida entonces.

Debido a la similitud del proceso y de las conclusiones obtenidas, y con la finalidad de evitar una exposición repetitiva, se resumen a continuación los valores óptimos de las variables numéricas de cálculo, deducidas para el presente modelo numérico 2 de torres de prilling, que, en definitiva, son totalmente similares a las del modelo numérico 1.

<p> <math>N</math> = Grado de discretización del prill ( mínimo ) = 50  <math>\Delta t_L</math> = Incremento tiempo cálculo Sección 1 = 0,0005 s  <math>\Delta t_A</math> = Incremento tiempo cálculo etapa A ( Sección 2 ) = 0,01 s  <math>\Delta t_B</math> = Incremento tiempo cálculo etapa B ( Sección 2 ) = 0,01 s  <math>\Delta t_S</math> = Incremento tiempo cálculo Sección 3 = 0,01 s         </p>
---

Los resultados finales del modelo numérico de cálculo de torres de prilling tipo 2 ( puesta a punto del programa TP2C ), referidos a la torre de prilling de urea experimental se resumen en el cuadro adjunto.

<p><u>Datos básicos del proceso</u></p> <p>           * Punto salida prill del pulverizador : M            * Velocidad inicial salida prill : <math>v_o = 3,24 \text{ m/s}</math> </p>
<p><u>Resultados de cálculo</u></p> <p>           * H = Altura torre = 32,56 m            * t = Tiempo residencia prill = 5,502 s            * TAS = Temperatura aire salida torre = 48,06 C         </p>

### 3.4.3.- CONTRASTACION EXPERIMENTAL DEL MODELO NUMERICO. CONCLUSIONES.

En el presente capítulo se ha elaborado un modelo numérico general de cálculo de torres de prilling, cuyas características básicas pueden resumirse como :

- a) Modelo numérico de cálculo aplicable a torres de prilling tipo 2 ( pulverizador rotativo ), siguiendo el modelo físico de torre, dividida en tres secciones.
- b) Modelo numérico utilizable, en principio, a cualquier proceso de prilling, desde el punto de vista de condiciones de operación ( producción de fertilizante, diámetro del prill, temperatura superficial final del prill, caudal de aire, temperatura de aire ).

En la elaboración de dicho modelo numérico, se ha utilizado gran parte de la información deducida en el modelo numérico 1 ( algoritmo de transmisión de calor, capítulo 2 ), requiriendo, no obstante, el desarrollo previo del modelo físico de pulverizador rotativo y del algoritmo numérico de la trayectoria del prill ( cf. apartados 3.2 y 3.3 ).

El principal objetivo en el presente modelo numérico de torres de prilling ha sido pues la integración óptima de estos dos algoritmos ( transmisión de calor y trayectoria del prill ).

Los resultados de cálculo obtenidos y su contrastación experimental se resumen en las Tablas 3.3 a 3.5 y las Figuras 3.9 a 3.14 adjuntas.

El análisis de dichos resultados permite deducir las conclusiones generales que a continuación se especifican.

#### Punto 1

El estudio de los resultados de la Tabla 3.3 permite deducir la gran similitud de tiempos de residencia y procesos de transmisión de calor entre los tres tipos de prills considerados del pulverizador rotativo ( Puntos S, M, I ).

En este sentido, el punto M representa aproximadamente el valor medio del estado térmico final del prill de los 3 casos o puntos estudiados ( Cf. Tabla 3.3, valores  $T(1)$  y  $T(N)$  ).

A la vista de estos resultados, en cierto modo previsibles inicialmente, se decide elegir el punto M como el punto representativo del proceso de prilling, utilizando pulverizadores rotativos.

En consecuencia, para el resto de cálculos realizados ( Tablas 3.4 y 3.5, Figuras 3.9 a 3.14 ) se han utilizado los datos de operación del punto M.

#### Punto 2

Los resultados principales de cálculo del modelo numérico presentan una buena concordancia con los datos experimentales ( Tabla 3.4 ) : Desviación de la altura de la torre de -3.4 % y desviación de la temperatura del aire a la salida de la torre de -0.8 %.

Esta constatación experimental permite aceptar la validez inicial del modelo numérico para el diseño y cálculo de torre de prilling tipo 2 ( pulverizador rotativo ), condicionada a posteriores contrastaciones adicionales con otras torres y otros tipos de fertilizantes ( nitrato amónico ).

De forma similar al modelo numérico 1, se confirma que el fenómeno más importante del proceso de prilling es la fase de solidificación del prill ( sección 2 ), que es la que requiere más tiempo de residencia y en consecuencia más altura ( 89 % de la altura total ).

### Punto 3

El modelo numérico desarrollado permite determinar o estimar, en todo instante, el estado térmico del prill ( perfil de temperatura ) y su situación en la torre ( alcance X y altura Y ).

Adicionalmente el modelo permite determinar la evolución de otras variables como : velocidad del prill ( magnitud y dirección ), coeficiente de transmisión de calor por convección prill - aire, temperatura del aire.

La evolución de los parámetros o variables mencionadas se resumen en las figuras 3.9 a 3.14 adjuntas.

Este conjunto de figuras y resultados viene a constatar las posibilidades de cálculo del modelo numérico desarrollado.

### Punto 4

En la tabla inferior se resumen los resultados principales de cálculo de los dos modelos numéricos desarrollados, referidos a la misma torre de prilling experimental ( mismas condiciones de operación ).

Variable	Datos torre experimental	Resultados modelo numérico 1 ( Pulverizador estático )	Desviación relativa	Resultados modelo numérico 2 ( Pulverizador rotativo )	Desviación relativa
H = Altura torre	33,7 m	34,87 m	+ 3,5 %	32,56 m	- 3,4 %
TAS = Temp. aire salida torre	48,43 C	48,06 C	- 0,8 %	48,06 C	- 0,8 %
t = Tiempo residencia prill	—	5,323 s	—	5,502 s	—

↑  
Torre prilling tipo 2 ( Pulverizador rotativo )

De la observación de esta tabla puede deducirse que no existe una gran diferencia de resultados entre el modelo numérico 1 y el modelo numérico 2.

En este sentido, puede afirmarse que el tipo de pulverizador no condiciona, de forma importante, la altura de la torre calculada (diferencia aproximada del 7% entre modelos).

Asimismo, se observa una gran similitud de los resultados obtenidos por ambos métodos, en lo que concierne a la evolución del perfil de temperatura del prill, en cada sección de la torre (modelo 1 : fig. 2.4 , p. 2-86 / modelo 2 : fig. 3.9, p. 3-40 ) y a la evolución de la temperatura del aire, a lo largo de la torre (modelo 1 : fig. 2.5 , p. 2-87 / modelo 2 : fig. 3.10, p. 3-41 ).

Esta constatación es explicable, en líneas generales, analizando y comparando el proceso de transmisión de calor en ambos modelos de cálculo, según se resume a continuación.

a) En el modelo numérico 1, la velocidad de caída del prill se considera prácticamente constante, desde el pulverizador hasta la base de la torre.

En consecuencia, el coeficiente de transmisión de calor prill - aire (  $h$  ) va a mantenerse asimismo prácticamente constante, a lo largo de la torre, ya que dicho coeficiente es claramente más dependiente de la velocidad del prill que de la temperatura del aire ( cf. apartado 2.3 ).

b) En el modelo numérico 2, la velocidad de caída del prill no es constante, variando, en magnitud y dirección, desde un valor inicial a la salida del pulverizador ( 3,24 m / s ), hasta un valor prácticamente constante ( 6,50 m / s ), a los 2 segundos aproximadamente de haber abandonado el pulverizador ( cf. figura 3.12 ).

Siguiendo la evolución de la velocidad del prill, el coeficiente de transmisión de calor prill - aire (  $h$  ) va a presentar una zona de transición ( 2 segundos aproximadamente ), evolucionando, desde un valor inicial de 203 W / m<sup>2</sup> C , hasta un valor de 281 W / m<sup>2</sup>C, que va a mantenerse prácticamente constante hasta la base de la torre.

Durante este tiempo de transición, la transmisión de calor prill - aire será menor que en el caso anterior ( modelo 1 ), requiriendo, pues, un mayor tiempo de residencia total, para alcanzar la misma temperatura superficial final del prill de 75 C ( modelo numérico 1 : tiempo total = 5,323 s, modelo numérico 2 : tiempo total = 5,502 s ).

En definitiva, los perfiles de temperatura del prill a la entrada y salida de cada sección de la torre serán muy similares en cada modelo de cálculo, difiriendo en el tiempo necesario para alcanzar dichos perfiles.

Esta constatación hace presuponer que, de las dos resistencias térmicas de transmisión de calor presentes en el proceso de prilling ( conducción en el interior del prill, convección exterior prill - aire ), ésta última es la que rige predominantemente el fenómeno.

Dicha suposición es analizada y confirmada posteriormente ( capítulos 4 y 5 ), deduciendo, no obstante, que la conducción en el interior del prill no es despreciable.

**Tabla 3.3 : Resultados previos del modelo numérico 2 de cálculo de torres de de prilling ( Programa TP2C ).**  
**Resultados comparativos para diferentes cotas de salida del prill del pulverizador.**

**DATOS DEL PROCESO**

- \* Tipo de pulverizador : Rotativo
- \*  $\dot{m}_f$  = Producción urea = 13.815 kg/h
- \*  $D_p$  = Diámetro prill = 1,5 mm
- \*  $v_o$  = Velocidad inicial salida prill = Según especific. de cálculo
- \*  $T_o$  = Temperatura inicial prill = 138 C
- \*  $T_s$  = Temperatura solidificación prill = 132,7 C
- \*  $T_{STOP}$  = Temp. superficial final prill = Según especific. de cálculo
- \* TAE = Temperatura aire entrada torre = 35 C
- \*  $\dot{V}_a$  = Caudal aire entrada torre = 304.500 m<sup>3</sup> / h
- \* D = Diámetro torre = 12,4 m

**DATOS NUMERICOS DE CALCULO**

- \* N = Grado discretización prill = 50
- \*  $\Delta t_L$  = 0,0005 s ( Sección 1 )
- \*  $\Delta t_A$  = 0,01 s ( Sección 2 : Etapa A )
- \*  $\Delta t_B$  = 0,01 s ( Sección 2 : Etapa B )
- \*  $\Delta t_S$  = 0,01 s ( Sección 3 )

**ESPECIFICACIONES DE CALCULO**

**Esquema pulverizador**

Dimensiones en mm

Situación orificio	Velocidad salida prill $v_o$ (m/s)	Tem. superficial final prill (C)	Altura o caída prill $Y = H$ (m)
← Punto Superior	4,15	?	$H + 0,20$
← Punto Medio	3,24	75	$H$
← Punto Inferior	2,53	?	$H - 0,20$

Cálculo de referencia

**OBJETIVO BASICO DE CALCULO :** Determinar las diferencias del proceso de prilling entre los diferentes puntos de salida del prill del pulverizador ( Puntos S , M , I )

**RESULTADOS DE CALCULO**

Punto	$v_o$ (m/s)	altura o caída del prill			temperatura final centro prill		velocidad final caída prill $v_p$ (m/s)
		t(s)	Xabs (m)	Y (m)	T(1) (C)	T(N) (C)	
S	4,15	5,536	3,599	32,76	82,42	73,80	6,495
M	3,24	5,502	2,836	32,56	83,90	75,00	6,496
I	2,53	5,470	2,216	32,36	85,27	76,10	6,496

tiempo residencia prill

temperatura final superficie prill ( TSTOP )

Tabla 3.4 : Resumen de resultados del modelo numérico 2 de cálculo de torres de de prilling ( Programa TP2C ), referido a una torre de prilling de urea.

#### DATOS DEL PROCESO

- \* Tipo de pulverizador : Rotativo
- \*  $\dot{m}_f$  = Producción urea = 13.815 kg/h
- \*  $D_p$  = Diámetro prill = 1,5 mm
- \*  $v_o$  = Velocidad inicial salida prill = 3,24 m/s ( Punto M )
- \*  $T_o$  = Temperatura inicial prill = 138 C
- \*  $T_s$  = Temperatura solidificación prill = 132,7 C
- \*  $T_{STOP}$  = Temperatura superficial final prill = 75 C
- \*  $T_{AE}$  = Temperatura aire entrada torre = 35 C
- \*  $\dot{V}_a$  = Caudal aire entrada torre = 304.500 m<sup>3</sup>/h
- \*  $D$  = Diámetro torre = 12,4 m

#### DATOS NUMERICOS DE CALCULO

- \*  $N$  = Grado discretización prill = 50
- \*  $\Delta t_L$  = 0,0005 s ( Sección 1 )
- \*  $\Delta t_A$  = 0,01 s ( Sección 2 : Etapa A )
- \*  $\Delta t_B$  = 0,01 s ( Sección 2 : Etapa B )
- \*  $\Delta t_S$  = 0,01 s ( Sección 3 )

Esquema torre prilling	Coef. transmisión calor convección prill - aire ( W / m2. C )		Velocidad caída prill ( m / s )		Tiempo residencia prill ( s )	Altura torre ( m )	Temperatura superficial prill	
	Temperatura aire ( C )	$h$	$v_o$	$h$			$T(1)$	$T(N)$
	← 48,06	3,24	203			138	138	
					$t_1 = 0,094$	$H_1 = 0,04$ (0,1 %)		
	← 47,86	3,11	205		$t_2 = 4,864$	$H_2 = 28,98$ (89,0 %)	138	132,7
	← 35,84	6,50	281		$t_3 = 0,545$	$H_3 = 3,54$ (10,9 %)	132,7	88,67
	← 35,00	6,50	281				83,90	75
					$t = 5,502$	$H = 32,56$		

#### ESPECIFICACIONES ADICIONALES

- \*  $\uparrow v_a$  = Velocidad ascensión aire = variable ( tramo a tramo )
- \*  $\downarrow v_p$  = Velocidad ( neta ) caída prill = variable ( tramo a tramo )
- \*  $h$  = Coeficiente transmisión de calor por convección prill - aire = variable ( tramo a tramo )



Tabla 3.5 : Comparación entre los resultados numéricos y experimentales de la torre de prilling de urea de referencia

ESPECIFICACIONES INICIALES

\* Modelo numérico de cálculo : Torres de prilling tipo 2 ( Pulverizador rotativo )  
( Programa TP2C )

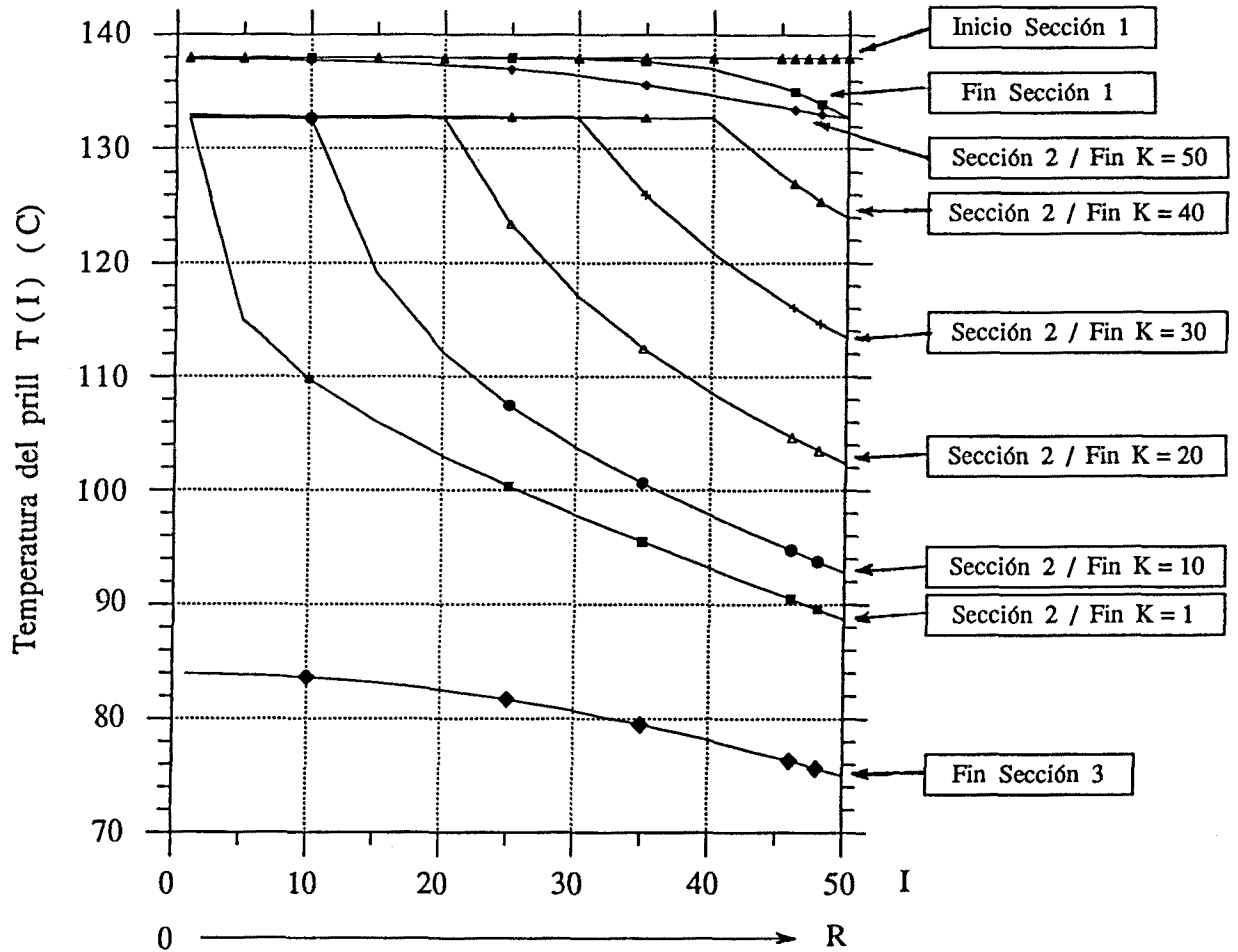
\* Datos experimentales : Torres de prilling tipo 2 ( Pulverizador rotativo )  
( cf. apartado 1.4 )

Variable	Resultado modelo numérico	Dato experimental	Desviación absoluta ( m )	Desviación relativa
H = Altura torre	32,56 m.	33,7 m.	- 1,14 m.	- 3,4 %
TAS = Temperatura aire salida torre	48,06 C	48,43 C	- 0,37 C	- 0,8 %
t = Tiempo residencia prill	5,502 sec	—	—	—

ESPECIFICACIONES ADICIONALES

- 1) La altura experimental de la torre corresponde a la diferencia de cota entre el punto medio del pulverizador rotativo y la base de la torre ( Altura media de caída del prill )
- 2) La temperatura del aire a la salida de la torre corresponde al valor de la temperatura a la entrada de los ventiladores, situados en la parte superior de la torre.

Figura 3.9 : Evolución del perfil de temperatura del prill  
( según modelo numérico TP2C )



#### ESPECIFICACIONES

Sección 1 : Enfriamiento prill líquido

Sección 2 : Solidificación prill

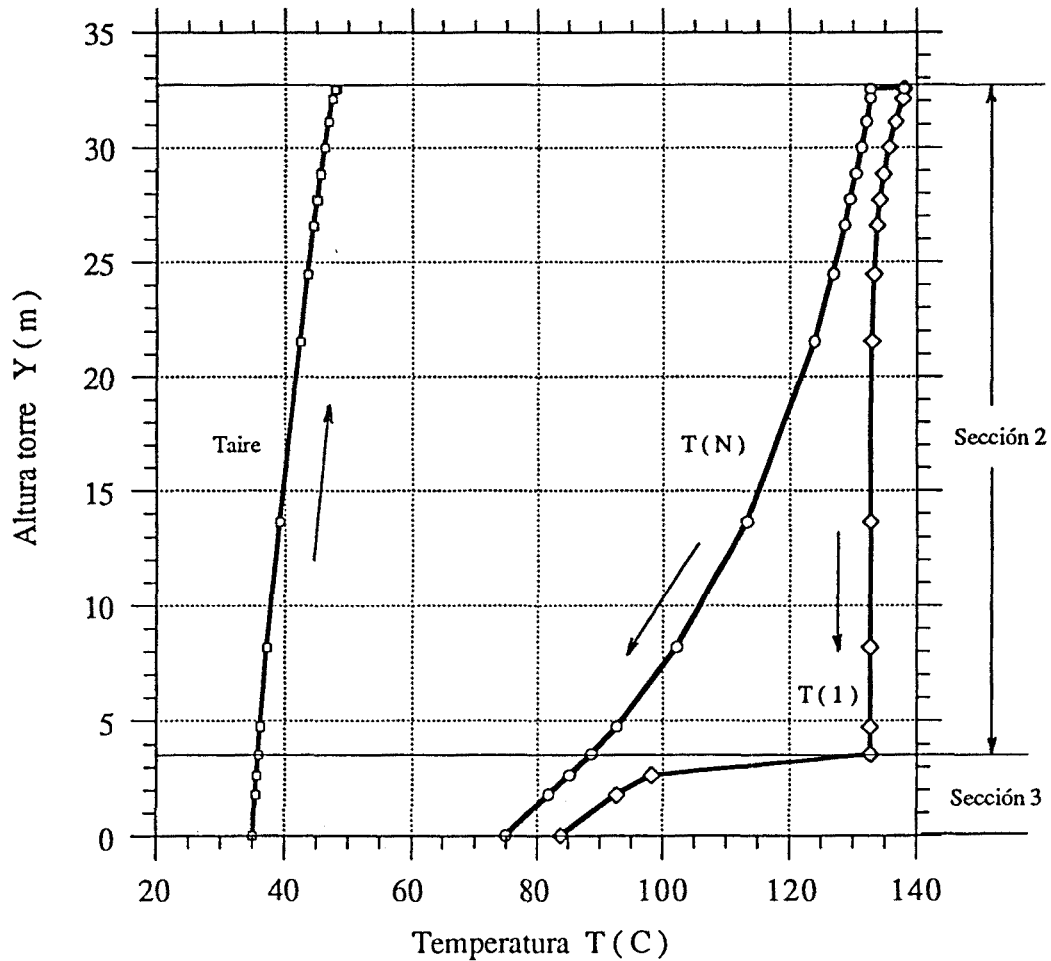
Sección 3 : Enfriamiento prill sólido

I : Elemento o volumen de control del prill  
( discretización del prill )

K : Elemento o volumen de control del prill  
en cambio de fase ( solidificación )

R : Radio del prill ( = 0,75 mm )

Figura 3.10 : Evolución de la temperatura del aire y de la temperatura del prill con la altura de la torre ( según modelo numérico TP2C )



#### ESPECIFICACIONES

Sección 2 : Solidificación prill

Sección 3 : Enfriamiento prill sólido

Taire : Temperatura del aire

T(1) : Temperatura centro prill

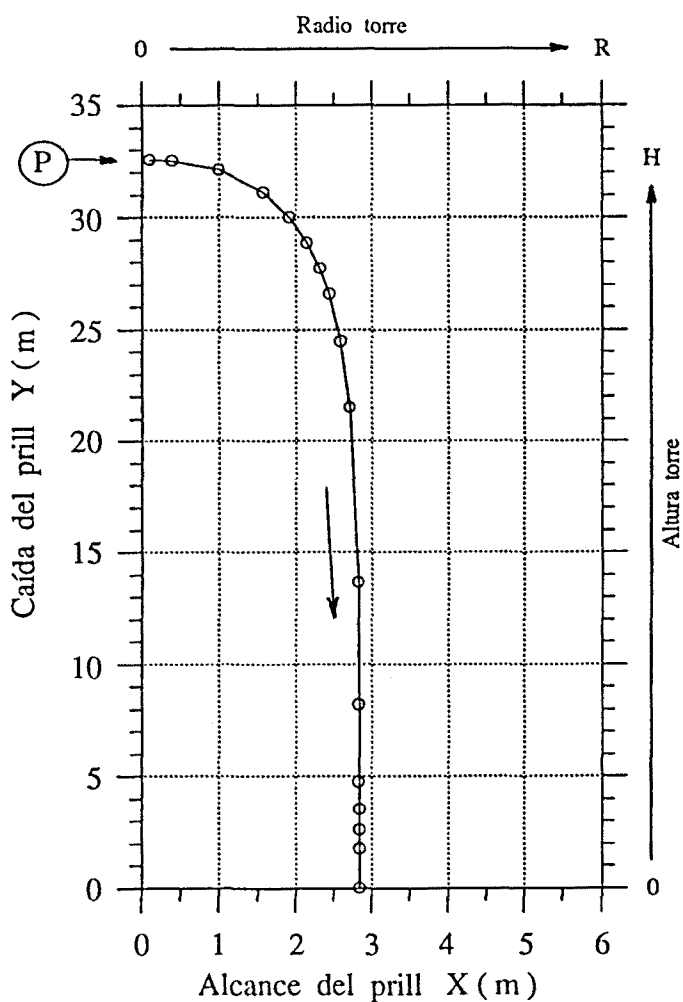
T(N) : Temperatura superficie prill

La altura de la Sección 1 (Enfriamiento prill líquido) no es representable claramente en el gráfico, debido a su pequeño valor ( $H_1 = 0,04$  m.) respecto a la escala de dicho gráfico.

Figura 3.11 : Trayectoria del prill en la torre ( según modelo numérico TP2C )

DATOS DEL PROCESO

- \*  $D_p$  = Diámetro del prill = 1,5 mm
- \* Punto de salida del prill del pulverizador : M
- \*  $v_o$  = Velocidad inicial salida del prill = 3,24 m/s



ESPECIFICACIONES

(P) Pulverizador rotativo

Las pequeñas dimensiones del pulverizador (radio en el punto de salida del prill = 96 mm), respecto al radio de la torre (6,20 m), no permiten su representación apreciable en la escala utilizada en el gráfico.

Figura 3.12 : Evolución de la velocidad de caída del prill ( según modelo numérico TP2C )

DATOS DEL PROCESO

- \*  $D_p$  = Diámetro del prill = 1,5 mm
- \* Punto de salida del prill del pulverizador : M
- \*  $v_o$  = Velocidad inicial salida del prill = 3,24 m/s

ESPECIFICACIONES

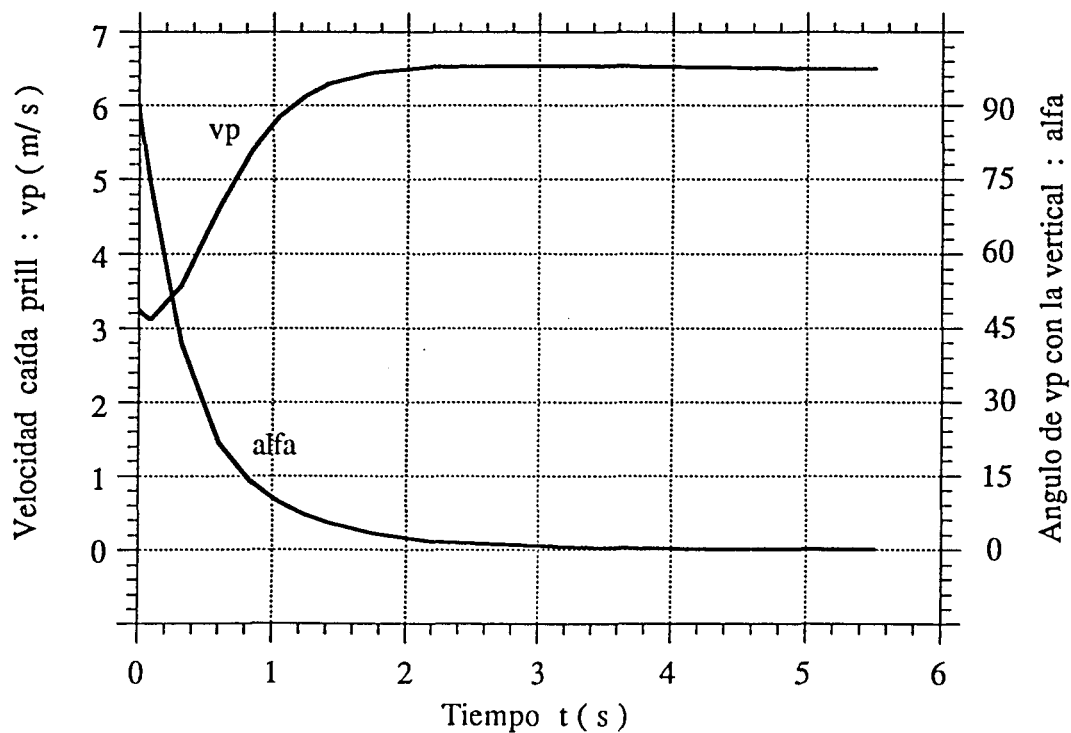
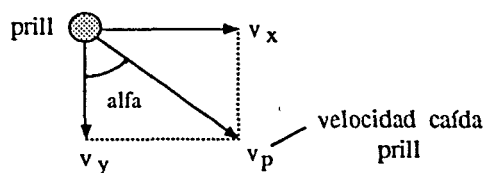


Figura 3.13 : Evolución del coeficiente de transmisión de calor por convección prill - aire  
(según modelo numérico TP2C)

DATOS DEL PROCESO

- \*  $D_p$  = Diámetro del prill = 1,5 mm
- \* Punto de salida del prill del pulverizador : M
- \*  $v_o$  = Velocidad inicial salida del prill = 3,24 m/s

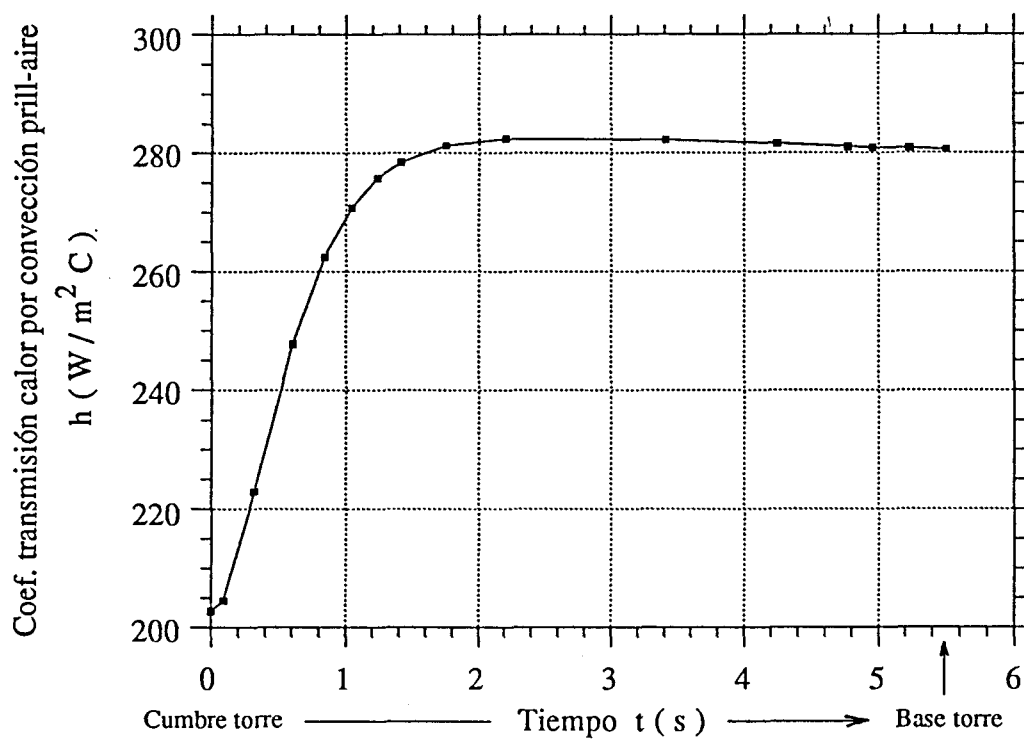
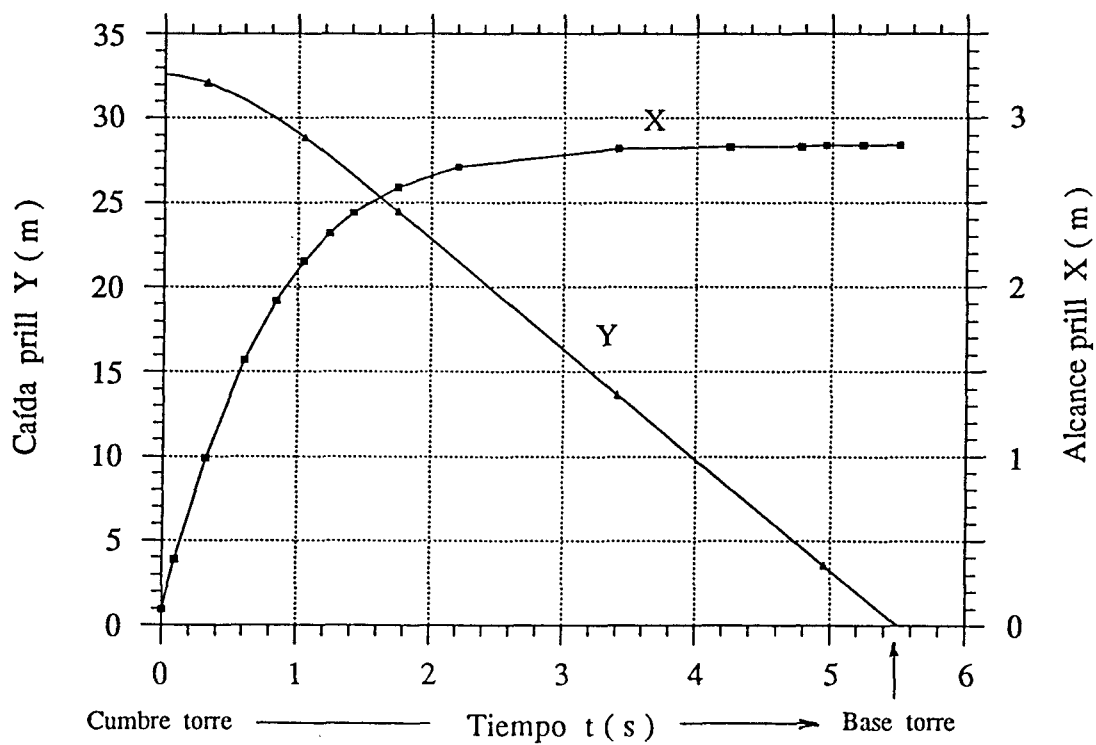
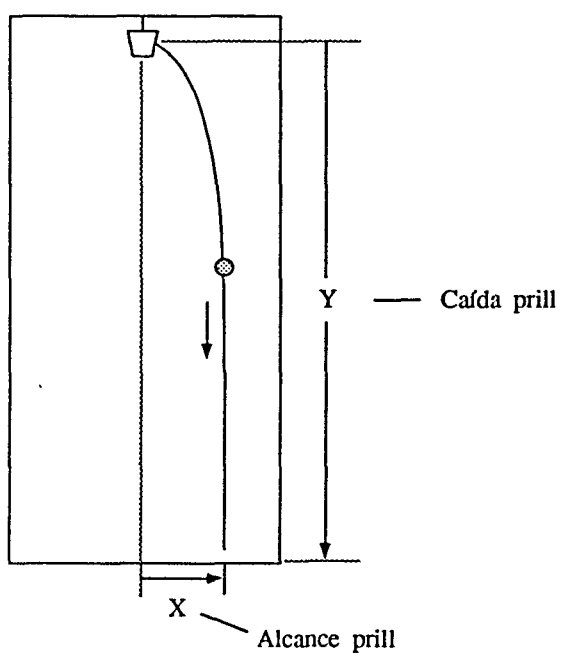


Figura 3.14 : Evolución del alcance y de la caída del prill en la torre (según modelo numérico TP2C)



### **3.5.- MODELO NUMERICO DE SIMULACION DE TORRES DE PRILLING ( PROGRAMA TP2S ).**

#### **3.5.1.- DESARROLLO DEL ALGORITMO DE SIMULACION.**

##### **3.5.1.1.- Introducción.**

En el presente apartado se resume el desarrollo del algoritmo general de simulación de torres de prilling tipo 2 ( pulverizador rotativo ).

Dicho algoritmo, de forma similar al programa TP2C, está compuesto por dos bloques integrados :

- 1) Algoritmo numérico de transmisión de calor prill - aire.
- 2) Algoritmo numérico de trayectoria del prill.

La estructura general del programa TP2S, en lo concerniente a los algoritmos mencionados, es muy similar al programa de cálculo TP2C, desarrollado previamente ( cf. apartado 3.4 ).

No obstante, se presentan diferencias conceptuales importantes entre el modo de operación y objetivos de ambos programas ( cf. apartados 1.3.3 y 1.3.4 ), los cuales se resumen a continuación.

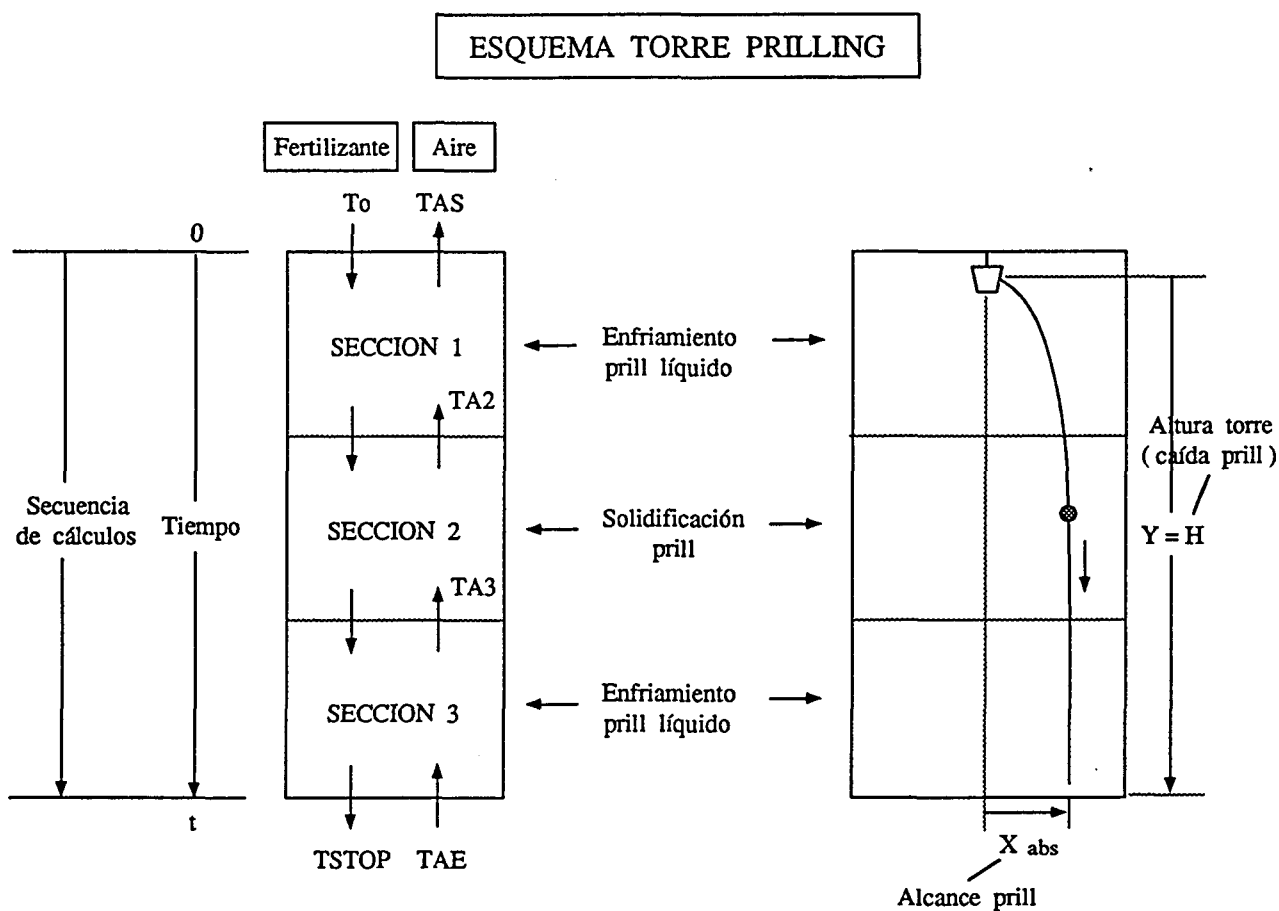
- 1) En el programa de cálculo TP2C, a partir de las condiciones de operación de entrada y salida de la torre, se persigue dimensionar dicho equipo, es decir determinar su altura.
- 2) En el programa de cálculo TP2S, a partir de las condiciones de operación de entrada de la torre y de las dimensiones de ésta ( altura, diámetro ), se persigue determinar las condiciones de salida ( fundamentalmente TSTOP = temperatura superficial final del prill ).

En los apartados que siguen, se indican, de forma resumida, las etapas seguidas para el desarrollo y puesta a punto del programa TP2S, excluyendo las especificaciones comunes al programa TP2C, con el objeto de no realizar una descripción repetitiva.

Debe indicarse que el programa TP2S será utilizado básicamente en el análisis paramétrico de torres de prilling, desarrollado en el capítulo 4 de la presente tesis doctoral.



## 3.5.1.2.- Organigrama general del programa.

**HIPOTESIS BASICAS DE CALCULO**

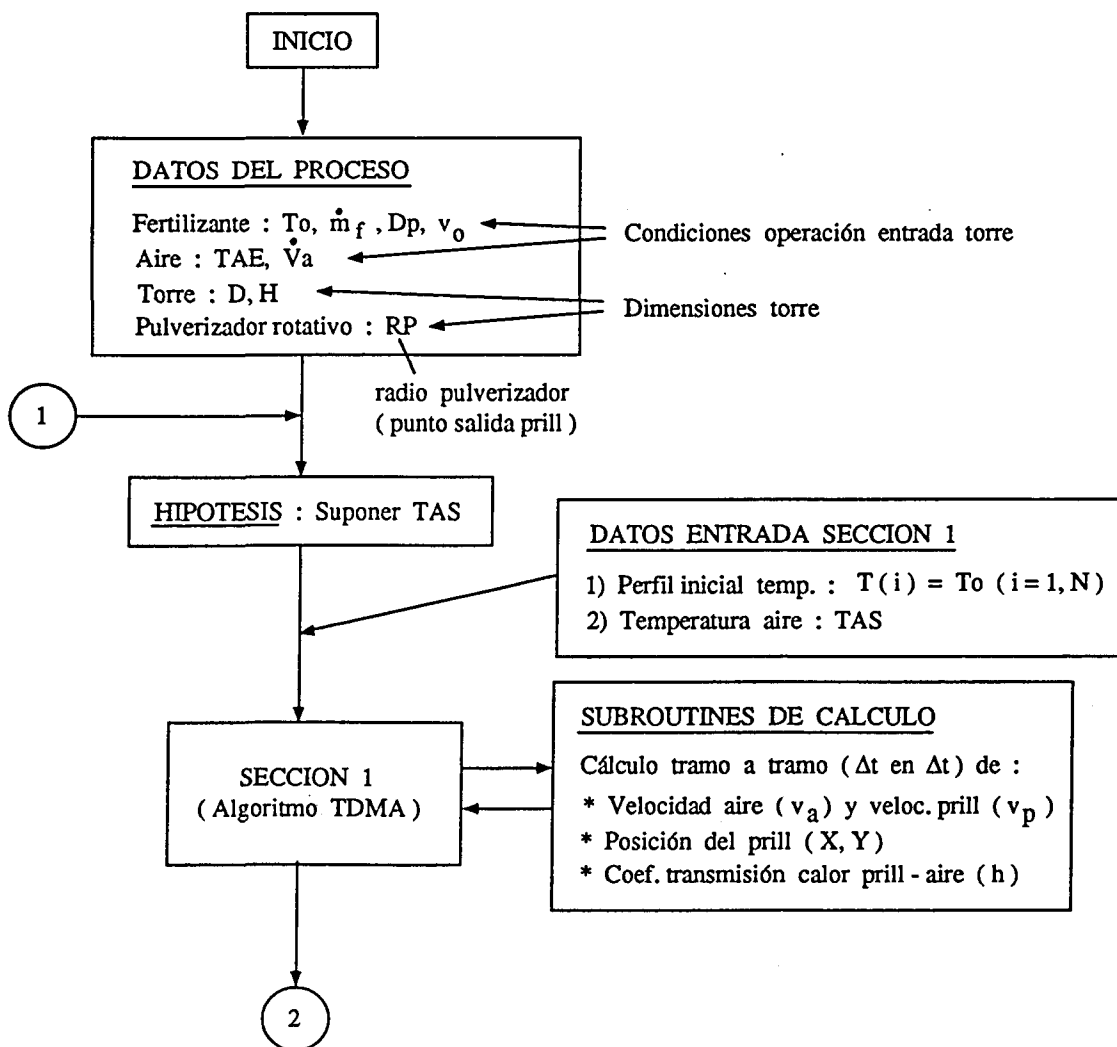
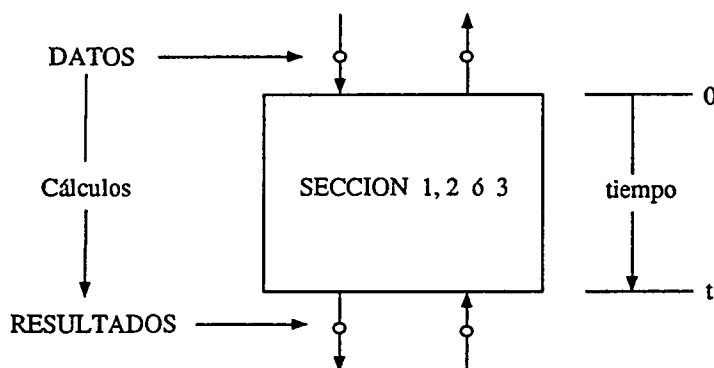
Símbolo	Variable	Hipótesis	Temperatura de cálculo de la variable
$v_a$	Velocidad ascensión aire	Valor variable (Cálculo tramo a tramo $\Delta t$ )	Temperatura media del aire para cada $\Delta t$ de cálculo
$v_p$	Velocidad absoluta caída prill	Valor variable (Cálculo tramo a tramo $\Delta t$ )	Temperatura media del aire para cada $\Delta t$ de cálculo
$h$	Coefficiente transmisión calor por convección prill - aire	Valor variable (Cálculo tramo a tramo $\Delta t$ )	$T_{film} = \frac{T_p + T_a}{2}$ <p><math>T_p</math> : Temp. superficial prill  <math>T_a</math> : Temperatura media aire en el <math>\Delta t</math> de cálculo</p>

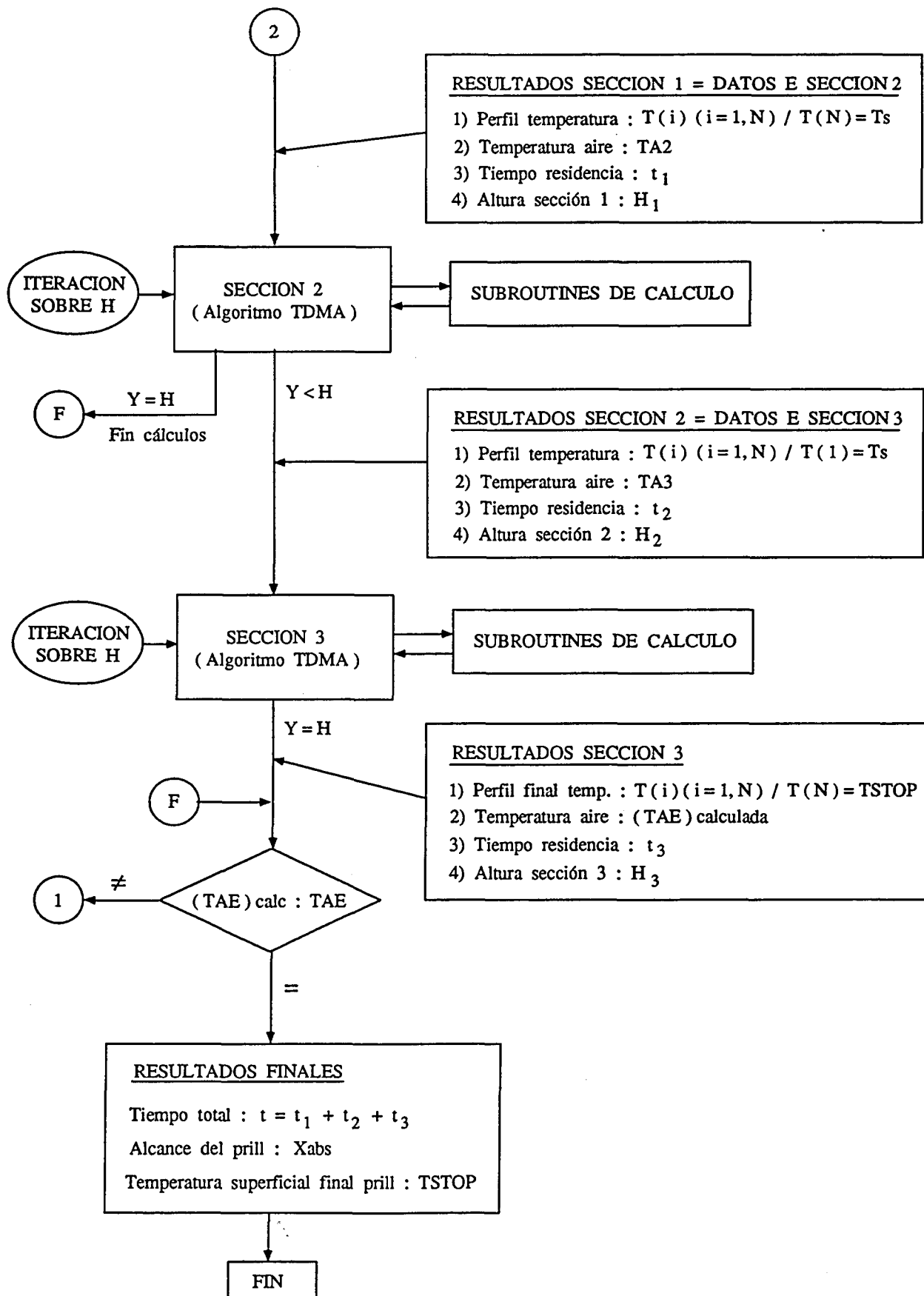
## ORGANIGRAMA GENERAL DEL ALGORITMO DE SIMULACION

Siguiendo el modelo físico de torre de prilling, dividida en 3 secciones, el proceso de cálculo persigue determinar básicamente :

- 1) Perfil de temperatura del prill a la salida de cada sección.
- 2) Temperatura del aire a la entrada de cada sección
- 3) Tiempo de residencia del prill en cada sección :  $t_1$  ,  $t_2$  y  $t_3$
- 4) Altura de cada sección de la torre :  $H_1$  ,  $H_2$  y  $H_3$

Variable básica de iteración del programa :  $H = H_1 + H_2 + H_3$   
 (  $H$  = altura total de la torre = conocida )

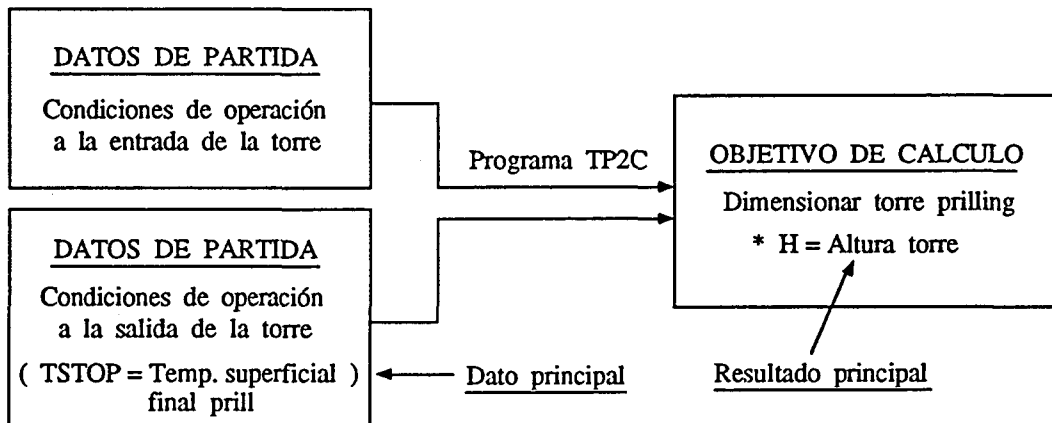




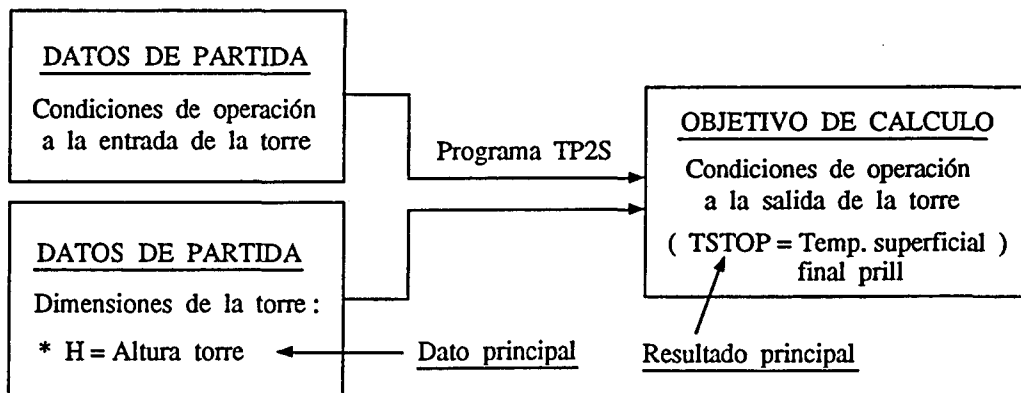
### 3.5.2.- PUESTA A PUNTO DEL ALGORITMO DE SIMULACION.

A la vista de toda la información previa recopilada en el desarrollo del programa TP2C, la puesta a punto del programa TP2S ha consistido esencialmente en la verificación del correcto funcionamiento del programa, en relación al programa TP2C.

Es decir, se han realizado una serie de dimensionados de torres de prilling, para diferentes condiciones de operación, utilizando el programa TP2C, según el siguiente proceso ( Cf. apartado 1.3.3 ) :



A continuación y utilizando estos resultados, se ha verificado el funcionamiento del programa TP2S, según el siguiente proceso ( Cf. apartado 1.3.4 ) :



Se ha observado una total concordancia entre los resultados obtenidos por ambos programas ( TP2C, TP2S ), por lo que se ha constatado la correcta elaboración y funcionamiento del programa TP2S.

Este programa será utilizado posteriormente en el análisis paramétrico de torres de prilling (capítulo 4).

**CAPITULO 4 : ANALISIS PARAMETRICO DE TORRES DE PRILLING  
MEDIANTE EL MODELO NUMERICO 2**

#### 4.1.- INTRODUCCION.

En el capítulo 3 se ha realizado el desarrollo y contrastación experimental del modelo numérico de cálculo ( programa TP2C ) y del modelo numérico de simulación ( programa TP2S ) de torres de prilling tipo 2 ( pulverizador rotativo ).

En el presente capítulo se utilizan dichos modelos numéricos para realizar un estudio o análisis paramétrico de torres de prilling.

Con dicho análisis se pretende determinar, de forma genérica, cuales son las variables o parámetros que mayor importancia o influencia tienen sobre el dimensionado de una torre de prilling (cálculo) y sobre su punto de funcionamiento (simulación).

Este estudio paramétrico se ha enfocado siguiendo las especificaciones indicadas en el Esquema 4.1 adjunto.

En relación el análisis paramétrico propuesto, se considera conveniente realizar las especificaciones que a continuación se indican :

- 1) Para analizar convenientemente la influencia de la variación porcentual del valor de un parámetro sobre el dimensionado ( altura ) o sobre el punto de funcionamiento ( TSTOP ) de una torre de prilling, se adopta el criterio lógico de mantener constantes (valor de diseño) el resto de parámetros a estudio ( variables termofísicas y/o condiciones de operación ).
- 2) Para cuantificar dicha influencia, se ha decidido elegir un margen de variación del resultado de cálculo de referencia ( H ) y del resultado de simulación de referencia ( TSTOP ) de  $\pm 5 \%$  con respecto a su valor de diseño.

Es decir, se intenta cuantificar cual será el margen de variación máxima o precisión mínima exigible al parámetro a estudio, de forma que su influencia sobre los resultados de referencia ( H , TSTOP ), se traduzca en una variación de éstos del  $\pm 5 \%$ , respecto a su valor de diseño.

Este planteamiento es aplicable al conjunto de todos los parámetros a estudio, exceptuando el diámetro del prill, cuya importante y especial influencia sobre los resultados de referencia, se analiza de forma absoluta.

Esquema 4.1 : Especificaciones y objetivos del análisis paramétrico de torres de prilling

Tipo de análisis	Modelo numérico utilizado	Parámetro a estudio	Objetivo del análisis
Análisis paramétrico de cálculo	Programa TP2C	1) <u>Variables termofísicas</u> * $h$ , $cp_a$ , $\Lambda$ * $cp_s$ , $cp_l$ * $K_s$ , $K_l$  2) <u>Condiciones operación</u> * Caudal másico fertilizante * Diámetro prill * Temp. superficial final prill * Caudal aire * Temp. aire entrada torre	Cuantificar la influencia del parámetro a estudio sobre el <u>dimensionado de la torre</u> .  Resultado de cálculo que se toma de referencia para el análisis : H = Altura torre
Análisis paramétrico de simulación	Programa TP2S	<u>Condiciones operación</u> * Caudal másico fertilizante * Diámetro prill * Caudal aire * Temp. aire entrada torre	Cuantificar la influencia del parámetro a estudio sobre el <u>punto de funcionamiento de la torre</u> .  Resultado de cálculo que se toma de referencia para el análisis : TSTOP = Temp. superficial final del prill

Simbología :

- \*  $h$  = Coeficiente transmisión calor prill - aire
- \*  $cp_a$  = Calor específico aire
- \*  $\Lambda$  = Calor latente solidificación fertilizante
- \*  $cp_s$  = Calor específico fertilizante sólido
- \*  $cp_l$  = Calor específico fertilizante líquido
- \*  $K_s$  = Conductividad térmica fertilizante sólido
- \*  $K_l$  = Conductividad térmica fertilizante líquido

## 4.2.-ANALISIS PARAMETRICO DE CALCULO DE TORRES DE PRILLING ( PROGRAMA TP2C ).

### Resultados

El conjunto de resultados obtenidos del análisis paramétrico de cálculo de torres de prilling, mediante el programa TP2C, se resume en las tablas y figuras adjuntas, según las siguientes especificaciones :

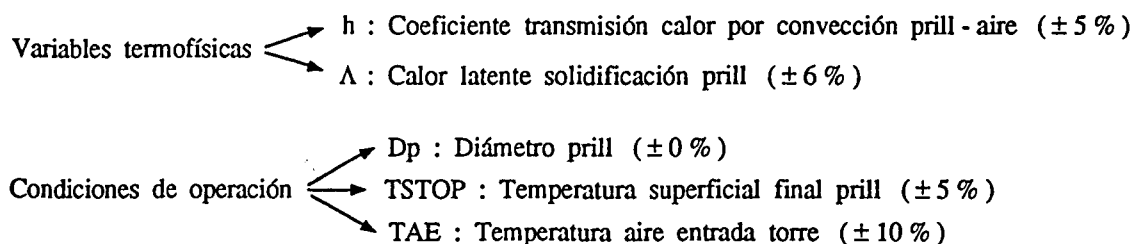
Figura	Parámetro a estudio	Tablas de resultados
4.1	Variables termofísicas ( $h$ , $cp_a$ , $\Lambda$ , $cp_s$ , $cp_l$ , $K_s$ , $K_l$ )	4.1 a 4.7
4.2-A	Condiciones de operación * $\dot{m}_f$ = producción fertilizante * $T_{STOP}$ = Temperatura superficial final prill * $\dot{V}_a$ = Caudal aire * TAE = Temperatura aire entrada torre.	4.8 a 4.11
4.2-B	Condiciones de operación * $D_p$ = Diámetro prill	4.12

### Conclusiones previas

Tomando de referencia los datos de operación de la torre de urea experimental, el análisis de los resultados obtenidos ha permitido cuantificar, de forma orientativa, la precisión mínima exigible a las variables termofísicas y el margen máximo de variación de las condiciones de operación que no van a provocar desviaciones superiores al  $\pm 5\%$  de la altura de cálculo de la torre de prilling (  $H = 32,56 \text{ m}$  = valor de diseño ).

Los resultados de dicho análisis se resumen en la tabla 4.13, de la cual pueden deducirse las conclusiones que a continuación se especifican.

1) Los parámetros que mayor influencia tienen sobre el dimensionado de una torre de prilling son :





De entre todos los parámetros a estudio, el diámetro del prill es, sin duda, el más determinante sobre la altura de cálculo de la torre.

El estudio de la figura 4.2-B permite justificar el hecho del porque no se construyen usualmente torre de prilling de urea, para prills con diámetros superiores a 2 mm.

A partir de este diámetro, las torre superan los 50 - 60 m de altura, apareciendo, tanto problemas constructivos, como de coste y rentabilidad.

- 2) El análisis de la figura 4.1 y de la tabla 4.7 permite deducir la prácticamente despreciable influencia de la conductividad térmica del fertilizante líquido sobre el dimensionado de la torre ( altura ).

Esta constatación permite confirmar, de forma implícita, la hipótesis de despreciar la convección de calor en el interior del prill, que se realizó al definir el modelo físico de la torre ( cf. apartado 1.3.2 ).

Tabla 4.13 : Resumen de resultados del análisis paramétrico de cálculo de torres de prilling ( Programa TP2C )

PARAMETRO A ESTUDIO	MARGEN DE VARIACION DEL PARAMETRO (*)
<u>* Variables termofísicas</u>	
	<u>Precisión mínima exigible</u>
* $h$ = Coeficiente transmisión calor prill - aire .....	$\pm 5\%$ ←
* $cp_a$ = Calor específico aire .....	$\pm 12\%$
* $\Lambda$ = Calor latente solidificación fertilizante .....	$\pm 6\%$ ←
* $cp_s$ = Calor específico fertilizante sólido .....	$\pm 15\%$
* $cp_l$ = Calor específico fertilizante líquido .....	$> \pm 50\%$
* $K_s$ = Conductividad térmica fertilizante sólido .....	$\pm 40\%$
* $K_l$ = Conductividad térmica fertilizante líquido .....	$> \pm 50\%$
<u>* Condiciones de operación</u>	
	<u>Margen máximo variación</u>
* $\dot{m}_f$ = Caudal másico fertilizante .....	$> \pm 50\%$
* $T_{STOP}$ = Temp. superficial final prill .....	$\pm 5\%$ ←
* $\dot{V}_a$ = Caudal aire .....	$\pm 25\%$
* TAE = Temp. aire entrada torre .....	$\pm 10\%$ ←
* $D_p$ = Diámetro prill .....	$\sim \pm 0\%$ ←

(\*) : Margen máximo de variación del parámetro a estudio, sin provocar variación de la altura de cálculo de la torre superior a  $\pm 5\%$  del valor de diseño (  $H = 32,56$  m )

Figura 4.1 : Cálculo de torres de prilling.  
Análisis paramétrico de variables termofísicas.

Simbología  
 h : Coeficiente de transmisión de calor por convección prill - aire  
 $\Lambda$  : Calor latente de solidificación del fertilizante ( urea )  
 Cpa : Calor específico del aire  
 Cps : Calor específico del fertilizante sólido ( urea )  
 Cpl : Calor específico del fertilizante líquido ( urea )  
 Ks : Conductividad térmica del fertilizante sólido ( urea )  
 Kl : Conductividad térmica del fertilizante líquido ( urea )

Tablas de referencia : 4.1 a 4.7

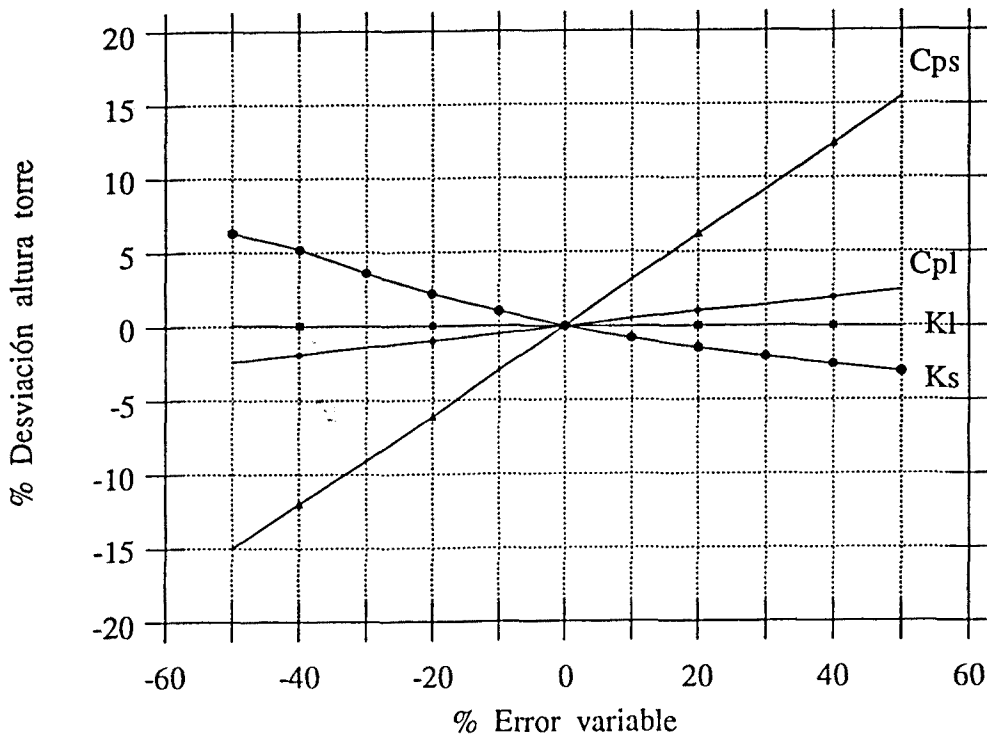
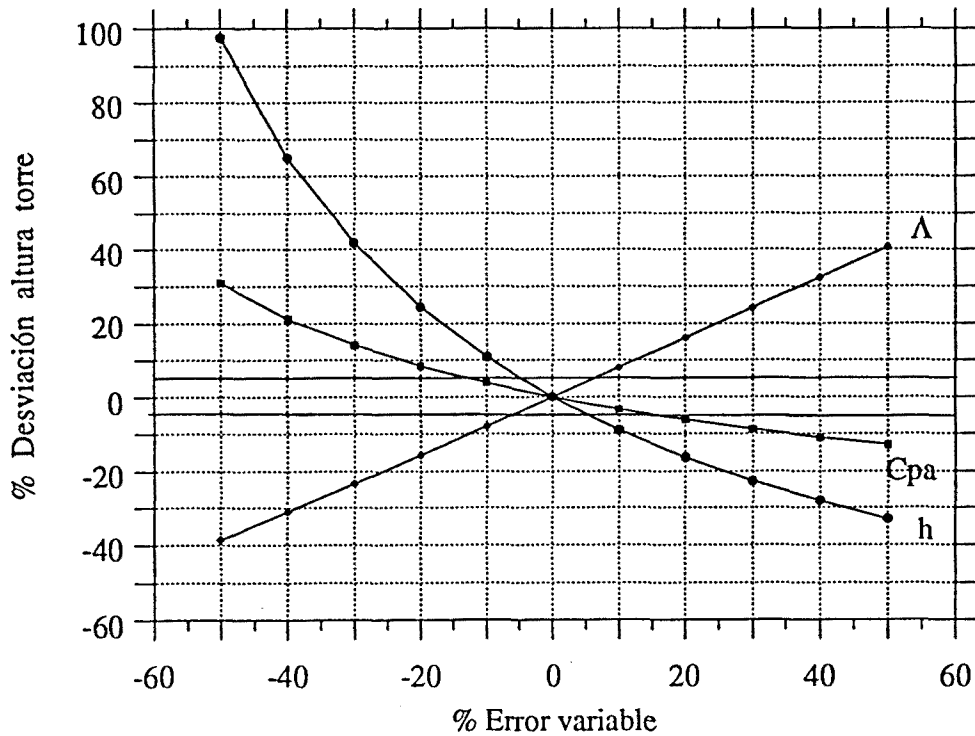


Figura 4.2-A : Cálculo de torres de prilling.  
Análisis paramétrico de condiciones de operación.

**Simbología**

$\dot{m}_f$  : Producción de fertilizante de la torre  
 $D_p$  : Diámetro del prill  
 $T_o$  = Temperatura inicial del prill  
 $T_{STOP}$  : Temperatura superficial final del prill  
 $\dot{V}_a$  : Caudal de aire a la entrada torre  
 $T_{AE}$  : Temperatura del aire a la entrada torre  
 $T_{AS}$  : Temperatura del aire a la salida torre

$H$  = Altura torre  
 $D$  = Diámetro torre

Tablas de referencia : 4.8 a 4.11

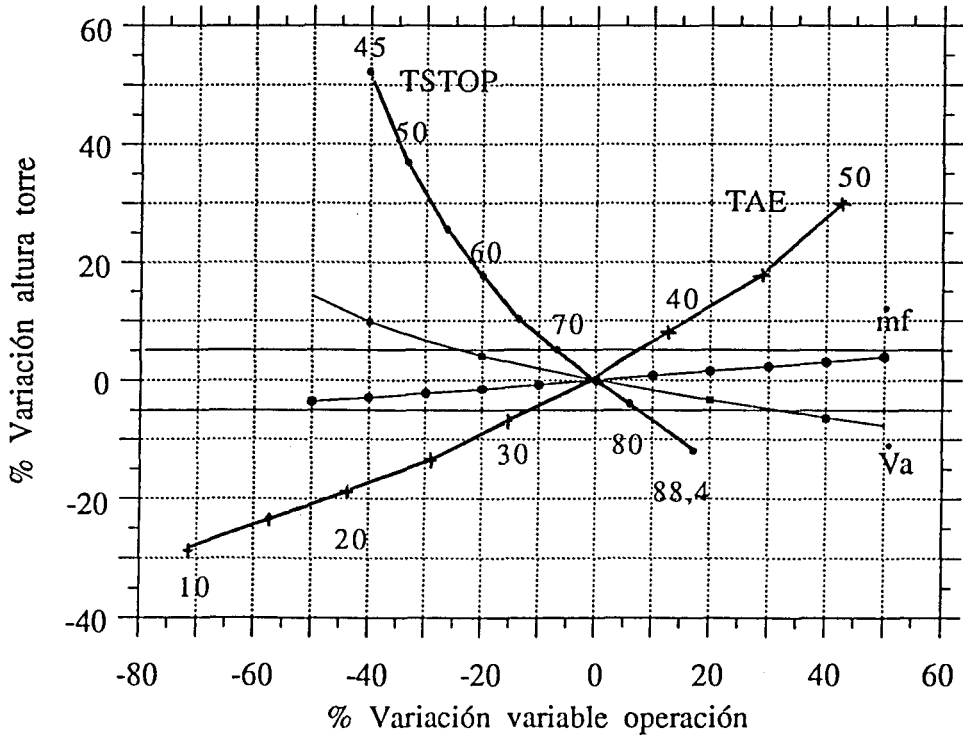
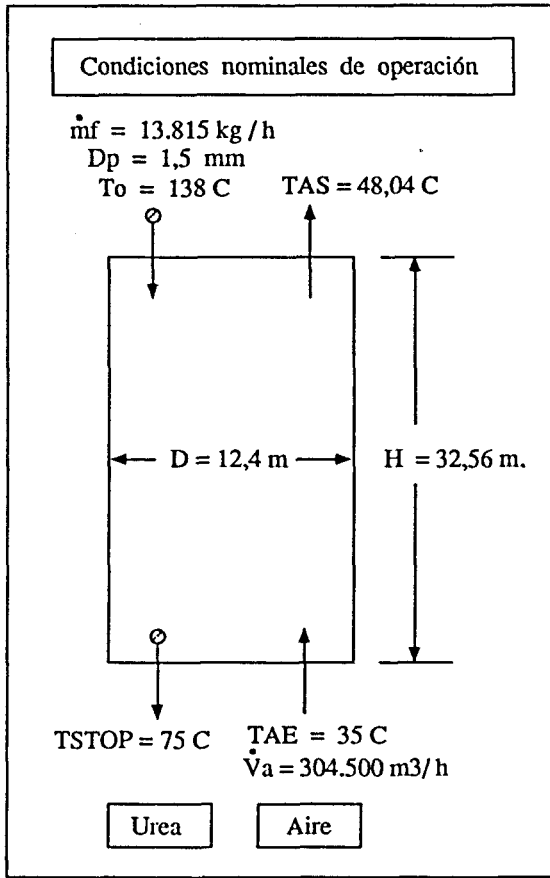
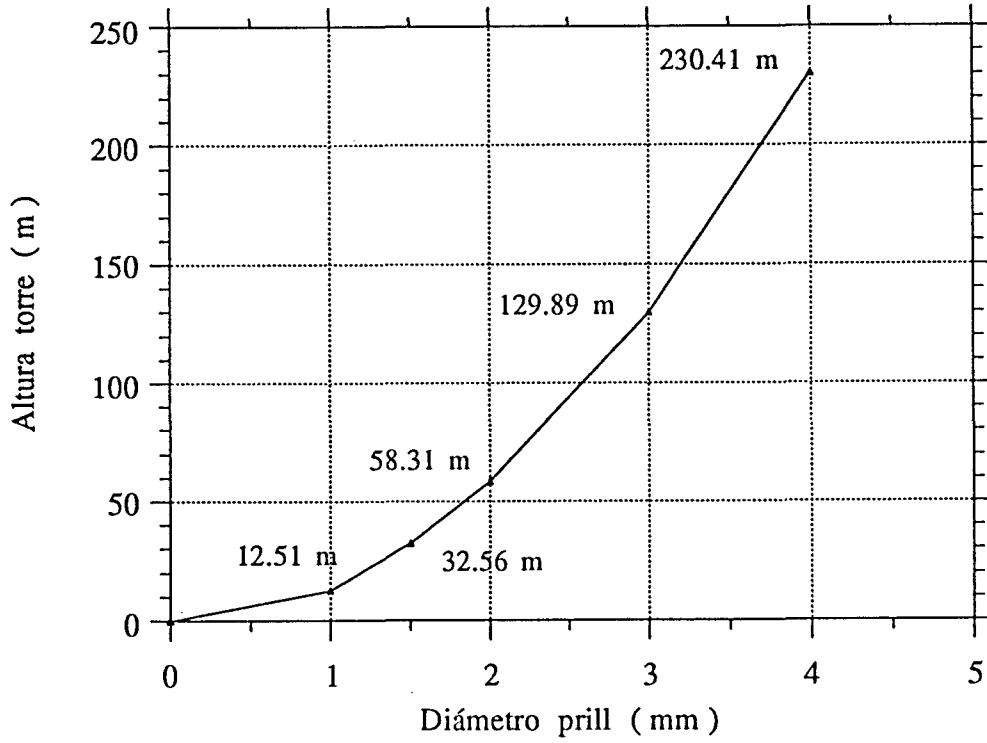


Figura 4.2-B : Cálculo de torres de prilling.  
Análisis paramétrico de condiciones de operación.

Tabla de referencia : 4.12



**TABLA 4.1 : CALCULO DE TORRES DE PRILLING**  
**ANALISIS PARAMETRICO DE VARIABLES TERMOFISICAS :**  
**COEFICIENTE DE TRANSMISION DE CALOR POR CONVECCION PRILL - AIRE ( h )**

% Error variable	Temp. aire salida torre	Altura torre calculada	% Desviación altura
- 50	48,15	64,33	+ 97,57
- 40	48,13	53,75	+ 65,10
- 30	48,12	46,20	+ 41,9
- 20	48,10	40,52	+ 24,4
- 10	48,08	36,10	+ 10,9
0	48,06	32,56	0
+ 10	48,04	29,66	- 8,9
+ 20	48,02	27,24	- 16,3
+ 30	48,00	25,18	- 22,7
+ 40	47,97	23,41	- 28,0
+ 50	47,94	21,85	- 32,9

**TABLA 4.2 : CALCULO DE TORRES DE PRILLING**  
**ANALISIS PARAMETRICO DE VARIABLES TERMOFISICAS :**  
**CALOR ESPECIFICO DEL AIRE**  
( Valor nominal de referencia :  $C_{pa} = 0,24 \text{ kcal / kg C} = 1,0 \text{ kJ / kg C}$  )

% Error variable	Temp. aire salida torre	Altura torre calculada	% Desviación altura
- 50	61,19	42,67	+ 31,0
- 40	56,81	39,49	+ 21,3
- 30	53,68	37,15	+ 14,1
- 20	51,34	35,31	+ 8,4
- 10	49,52	33,82	+ 3,9
0	48,06	32,56	0
+ 10	46,87	31,49	- 3,3
+ 20	45,87	30,56	- 6,1
+ 30	45,03	29,74	- 8,7
+ 40	44,31	29,00	- 10,9
+ 50	43,69	28,35	- 12,9

**TABLA 4.3 : CALCULO DE TORRES DE PRILLING**  
**ANALISIS PARAMETRICO DE VARIABLES TERMOFISICAS :**  
**CALOR LATENTE DE SOLIDIFICACION DEL FERTILIZANTE ( UREA )**  
 ( Valor nominal de referencia :  $\Lambda = 57,8 \text{ kcal / kg} = 241,8 \text{ kJ / kg}$  )

% Error variable	Temp. aire salida torre	Altura torre calculada	% Desviación altura
- 50	43,30	20,05	- 38,4
- 40	44,25	22,49	- 30,9
- 30	45,20	24,96	- 23,3
- 20	46,15	27,47	- 15,6
- 10	47,11	30,00	- 7,9
0	48,06	32,56	0
+ 10	49,01	35,15	+ 8,0
+ 20	49,97	37,78	+ 16,0
+ 30	50,92	40,44	+ 24,2
+ 40	51,87	43,12	+ 32,4
+ 50	52,83	45,85	+ 40,8

**TABLA 4.4 : CALCULO DE TORRES DE PRILLING**  
**ANALISIS PARAMETRICO DE VARIABLES TERMOFISICAS :**  
**CALOR ESPECIFICO DEL FERTILIZANTE SOLIDO ( UREA )**  
 ( Valor nominal de referencia :  $C_{ps} = 0,32 \text{ kcal / kg C} = 1,34 \text{ kJ / kg C}$  )

% Error variable	Temp. aire salida torre	Altura torre calculada	% Desviación altura
- 50	46,63	27,68	- 15,0
- 40	46,92	28,64	- 12,0
- 30	47,20	29,61	- 9,1
- 20	47,48	30,58	- 6,1
- 10	47,77	31,57	- 3,0
0	48,06	32,56	0
+ 10	48,35	33,56	+ 3,1
+ 20	48,64	34,57	+ 6,2
+ 30	48,92	35,57	+ 9,2
+ 40	49,20	36,58	+ 12,3
+ 50	49,49	37,60	+ 15,5

**TABLA 4.5 : CALCULO DE TORRES DE PRILLING**  
**ANALISIS PARAMETRICO DE VARIABLES TERMOFISICAS :**  
**CALOR ESPECIFICO DEL FERTILIZANTE LIQUIDO ( UREA )**

( Valor nominal de referencia :  $C_{pl} = 0,76 \text{ kcal / kg C} = 3,18 \text{ kJ / kg C}$  )

% Error variable	Temp. aire salida torre	Altura torre calculada	% Desviación altura
- 50	47,73	31,79	- 2,4
- 40	47,80	31,94	- 1,9
- 30	47,86	32,10	- 1,4
- 20	47,92	32,25	- 1,0
- 10	47,99	32,40	- 0,5
0	48,06	32,56	0
+ 10	48,13	32,72	+ 0,5
+ 20	48,19	37,88	+ 1,0
+ 30	48,26	33,03	+ 1,4
+ 40	48,32	33,19	+ 1,9
+ 50	48,39	33,35	+ 2,4

**TABLA 4.6 : CALCULO DE TORRES DE PRILLING**  
**ANALISIS PARAMETRICO DE VARIABLES TERMOFISICAS :**  
**CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL FERTILIZANTE SOLIDO ( UREA )**

( Valor nominal de referencia :  $K_s = 0,43 \text{ kcal / h m C} = 0,50 \text{ W / m C}$  )

% Error variable	Temp. aire salida torre	Altura torre calculada	% Desviación altura
- 50	47,72	34,60	+ 6,3
- 40	47,89	34,25	+ 5,2
- 30	47,97	33,75	+ 3,6
- 20	48,01	33,28	+ 2,2
- 10	48,04	32,89	+ 1,0
0	48,06	32,56	0
+ 10	48,08	32,29	- 0,8
+ 20	48,09	32,06	- 1,5
+ 30	48,10	31,86	- 2,1
+ 40	48,11	31,70	- 2,6
+ 50	48,12	31,55	- 3,1

**TABLA 4.7 : CALCULO DE TORRES DE PRILLING**  
**ANALISIS PARAMETRICO DE VARIABLES TERMOFISICAS :**  
**CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL FERTILIZANTE LIQUIDO ( UREA )**  
 ( Valor nominal de referencia :  $KI = 0,33 \text{ kcal / h m C} = 0,38 \text{ W / m C}$  )

% Error variable	Temp. aire salida torre	Altura torre calculada	% Desviación altura
- 50	48,06	32,589	+ 0,092
- 40	48,06	32,581	+ 0,061
- 30	48,06	32,575	+ 0,046
- 20	48,06	32,570	+ 0,031
- 10	48,06	32,566	+ 0,018
0	48,06	32,563	0
+ 10	48,06	32,561	- 0,004
+ 20	48,06	32,558	- 0,008
+ 30	48,06	32,556	- 0,022
+ 40	48,06	32,554	- 0,026
+ 50	48,06	32,552	- 0,031



**TABLA 4.8 : CALCULO DE TORRES DE PRILLING**  
**ANALISIS PARAMETRICO DE CONDICIONES DE OPERACION :**  
**PRODUCCION DE FERTILIZANTE ( UREA )**  
 ( Valor nominal de referencia :  $\dot{m}_f = 13.815 \text{ kg/h}$  )

% Variación variable operación	Temp. aire salida torre ( C )	Altura torre calculada ( m )	% Desviación altura
- 50	41,53	31,39	- 3,60
- 40	42,83	31,61	- 2,91
- 30	44,14	31,85	- 2,20
- 20	45,45	32,08	- 1,48
- 10	46,75	32,32	- 0,75
0	48,06	32,56	0
+ 10	49,37	32,81	+ 0,77
+ 20	50,67	33,06	+ 1,54
+ 30	51,98	33,32	+ 2,33
+ 40	53,28	33,58	+ 3,13
+ 50	54,59	33,85	+ 3,96

**TABLA 4.9 : CALCULO DE TORRES DE PRILLING**  
**ANALISIS PARAMETRICO DE CONDICIONES DE OPERACION :**  
**TEMPERATURA SUPERFICIAL FINAL DEL PRILL ( TSTOP )**  
 ( Valor nominal de referencia :  $T_{STOP} = 75 \text{ C}$  )

TSTOP ( C )	% Variac. variable op.	Temp. aire salida torre ( C )	Altura torre calculada ( m )	% Desviación altura
88,37 *	+ 17,8	47,23	28,75	- 11,7
80	+ 6,7	47,77	31,10	- 4,5
75	0	48,06	32,56	0
70	- 6,7	48,35	34,20	+ 5,0
65	- 13,3	48,63	36,06	+ 10,8
60	- 20,0	48,92	38,27	+ 17,5
55	- 26,7	49,21	40,97	+ 25,8
50	- 32,3	49,50	44,44	+ 36,5
45	- 40,0	49,79	49,31	+ 51,4

Nota \* : Temperatura superficial máxima del prill sólido que puede considerarse en el presente análisis paramétrico ( Situación : Fin Sección 2 = Fin Sección Solidificación prill ).

**TABLA 4.10 : CALCULO DE TORRES DE PRILLING**  
**ANALISIS PARAMETRICO DE CONDICIONES DE OPERACION :**  
**CAUDAL DE AIRE (ENTRADA TORRE)**  
 ( Valor nominal de referencia :  $\dot{V}_a = 304.500 \text{ m}^3/\text{h}$  )

% Variación variable operación	Temp. aire salida torre ( C )	Altura torre calculada ( m )	% Desviación altura
- 50	61,12	37,20	+ 14,2
- 40	56,77	35,80	+ 9,9
- 30	53,66	34,75	+ 6,7
- 20	51,32	33,90	+ 4,1
- 10	49,51	33,19	+ 1,9
0	48,06	32,56	0
+ 10	46,87	32,00	- 1,7
+ 20	45,88	31,47	- 3,3
+ 30	45,05	30,99	- 4,8
+ 40	44,33	30,53	- 6,3
+ 50	43,71	30,09	- 7,6

**TABLA 4.11 : CALCULO DE TORRES DE PRILLING**  
**ANALISIS PARAMETRICO DE CONDICIONES DE OPERACION :**  
**TEMPERATURA DEL AIRE (ENTRADA TORRE)**  
 ( Valor nominal de referencia : TAE = 35 C )

TAE ( C )	% Variac. variable op.	Temp. aire salida torre ( C )	Altura torre calculada ( m )	% Desviación altura
10	- 71,4	21,88	23,24	- 28,6
15	- 57,1	27,12	24,72	- 24,1
20	- 42,9	32,36	26,36	- 19,0
25	- 28,6	37,59	28,19	- 13,4
30	- 14,3	42,83	30,24	- 7,1
35	0	48,06	32,56	0
40	+ 14,3	53,29	35,22	+ 8,2
45	+ 28,6	58,53	38,33	+ 17,7
50	+ 42,9	63,76	42,01	+ 29,0

**TABLA 4.12 : CALCULO DE TORRES DE PRILLING**  
**ANALISIS PARAMETRICO DE CONDICIONES DE OPERACION :**

**DIAMETRO DEL PRILL ( UREA )**

( Valor nominal de referencia :  $D_p = 1,5 \text{ mm}$  )

Dp ( mm )	% Variac. variable op.	Temp. aire salida torre ( C )	Altura torre calculada ( m )	% Desviación altura
1	- 33,3	48,11	12,50	- 61,6
1,5	0	48,06	32,56	0
2	+ 33,3	48,02	58,31	+ 79,1
3	+ 100	47,92	129,89	+ 298,9
4 *	+ 166,7	47,90	230,41	+ 607,6

Nota \* : Para el caso de diámetro del prill ( $D_p$ ) de 4 mm, la altura de torre calculada corresponde a la situación de una torre sin Sección 3 ( Sección enfriamiento prill sólido ).

En dicho caso, al finalizar la Sección 2 ( Solidificación del prill ), la temperatura superficial del prill es inferior a 75 C ( TSTOP = 73,31 ).

### 4.3.- ANALISIS PARAMETRICO DE SIMULACION DE TORRES DE PRILLING ( PROGRAMA TP2S ).

#### Resultados

El conjunto de resultados obtenidos del análisis paramétrico de simulación de torres de prilling, mediante el programa TP2S, se resume en las tablas y figuras adjuntas, según las siguientes especificaciones :

Figura	Parámetro a estudio	Tablas de resultados
4.3-A	Condiciones de operación * $\dot{m}_f$ = producción fertilizante * $\dot{V}_a$ = Caudal aire * TAE = Temperatura aire entrada torre.	4.14 a 4.16
4.3-B	Condiciones de operación * $D_p$ = Diámetro prill a diferentes TAE	4.17

#### Conclusiones previas

Tomando de referencia la torre de urea experimental ( Altura = 32,56 m ), el análisis de los resultados obtenidos ha permitido cuantificar, de forma orientativa, el margen máximo de variación de las condiciones de operación que no van a provocar desviaciones superiores al  $\pm 5 \%$  de la temperatura superficial final del prill (  $T_{STOP} = 75 \text{ C} = \text{valor de diseño}$  ), considerada como resultado básico o más representativo de operación de la torre.

Los resultados de dicho análisis se resumen en la tabla 4.18, de la cual pueden deducirse las conclusiones que a continuación se especifican.

- 1) Los parámetros con mayor influencia sobre el punto de funcionamiento de una torre de prilling son :

Condiciones de operación  $\begin{cases} \rightarrow D_p : \text{Diámetro prill } (\pm 0 \%) \\ \rightarrow TAE : \text{Temperatura aire entrada torre } (\pm 7 \%) \end{cases}$

De dichos parámetros, el diámetro del prill es la variable de operación con mayor influencia sobre la temperatura superficial final del prill (  $T_{STOP}$  ).

En este sentido, el programa TP2S permite deducir, para una misma torre de prilling, la evolución del estado térmico final del prill para distintos tamaños del mismo (  $D_p = 1, 1,5, 2 \text{ mm}$  ), a diferentes temperaturas de entrada del aire exterior ( TAE ) ( cf. Tabla 4.17 / Figura 4.3-B ).

El análisis de resultados permite deducir, por ejemplo, que, en la torre de prilling de referencia del caso (  $H = 32,56 \text{ m}$  ), los prills de  $1 \text{ mm}$  siempre llegan totalmente solidificados a la base de la torre, para el margen de temperaturas de aire exterior consideradas (  $TAE = 0 \text{ a } 50 \text{ C}$  ).

Similar situación se presenta con los prills de  $1,5 \text{ mm}$  ; determinándose, en este caso, la temperatura exterior límite (  $TAE = 50 \text{ C}$  ), a partir de la cual dichos prills no llegan totalmente solidificados al final del proceso de prilling.

No obstante y según el modelo de simulación, los prills de  $2 \text{ mm}$  no llegan completamente solidificados a la base de la torre, para el margen de temperaturas de trabajo.

- 2) En definitiva el programa TP2S permite deducir los imperativos básicos y las condiciones límite de operación de la torre, que pueden resumirse como :
- El buen funcionamiento de la torre ( proceso de prilling ) depende muy directamente del buen funcionamiento del pulverizador, como equipo capaz de generar prills con una granulometría constante y estable, centrada en un diámetro de  $1,5 \text{ mm}$ .
  - La temperatura límite del aire exterior para el correcto funcionamiento del proceso de prilling (  $D_p = 1,5 \text{ mm}$  ) se ha estimado en  $50 \text{ C}$  ( temperatura raramente alcanzable en Málaga, localidad donde se halla ubicada la torre experimental de urea ).
  - Las fluctuaciones, más o menos significativas, del caudal de aire (  $\dot{V}_a$  ) y de producción de fertilizante (  $\dot{m}_f$  ) no afectan sustancialmente el punto de funcionamiento de la torre.

Tabla 4.18 : Resumen de resultados del análisis paramétrico de simulación de torres de prilling ( Programa TP2S )

PARAMETRO A ESTUDIO	MARGEN DE VARIACION DEL PARAMETRO (*)
* <u>Condiciones de operación</u>	<u>Margen máximo variación</u>
* $\dot{m}_f$ = Caudal másico fertilizante .....	$> \pm 50 \%$
* $\dot{V}_a$ = Caudal aire .....	$\pm 20 \%$
* TAE = Temp. aire entrada torre .....	$\pm 7 \%$ ←
* $D_p$ = Diámetro prill .....	$\sim \pm 0 \%$ ←

(\*) : Margen máximo de variación del parámetro a estudio, sin provocar variación de la temperatura superficial final del prill superior a  $\pm 5 \%$  del valor de diseño (  $T_{STOP} = 75 \text{ C}$  ).

Figura 4.3-A : Simulación de torres de prilling.  
Análisis paramétrico de condiciones de operación.

**Simbología**

- $\dot{m}_f$  : Producción de fertilizante de la torre
- $D_p$  : Diámetro del prill
- $T_o$  = Temperatura inicial del prill
- TSTOP : Temperatura superficial final del prill
- $\dot{V}_a$  : Caudal de aire a la entrada torre
- TAE : Temperatura del aire a la entrada torre
- TAS : Temperatura del aire a la salida torre
- H = Altura torre
- D = Diámetro torre

Tablas de referencia : 4.14 a 4.16

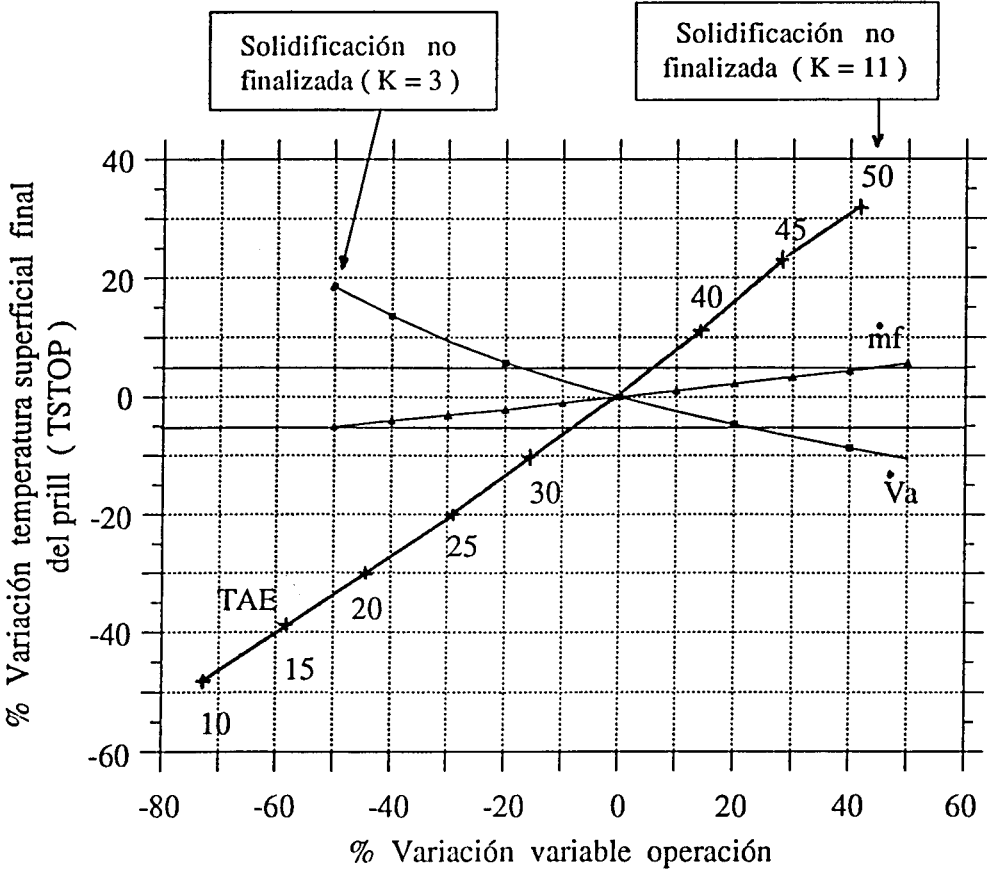
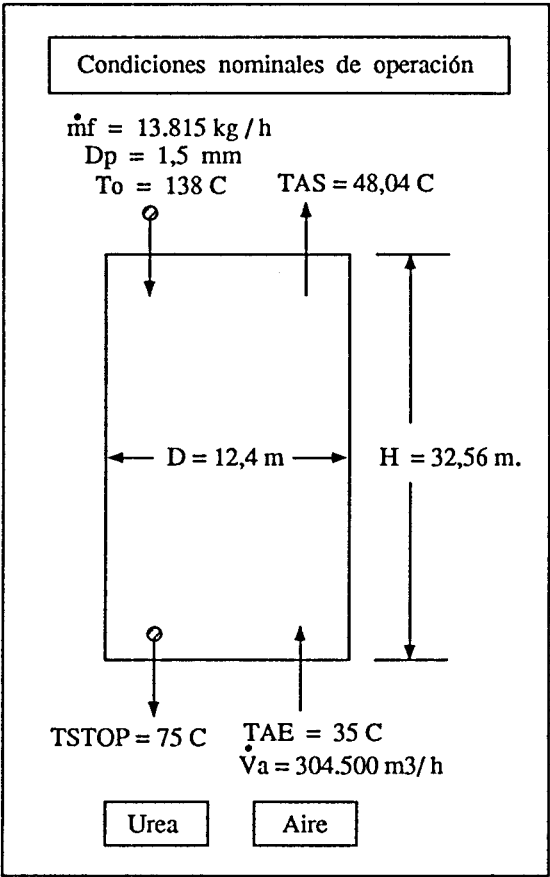
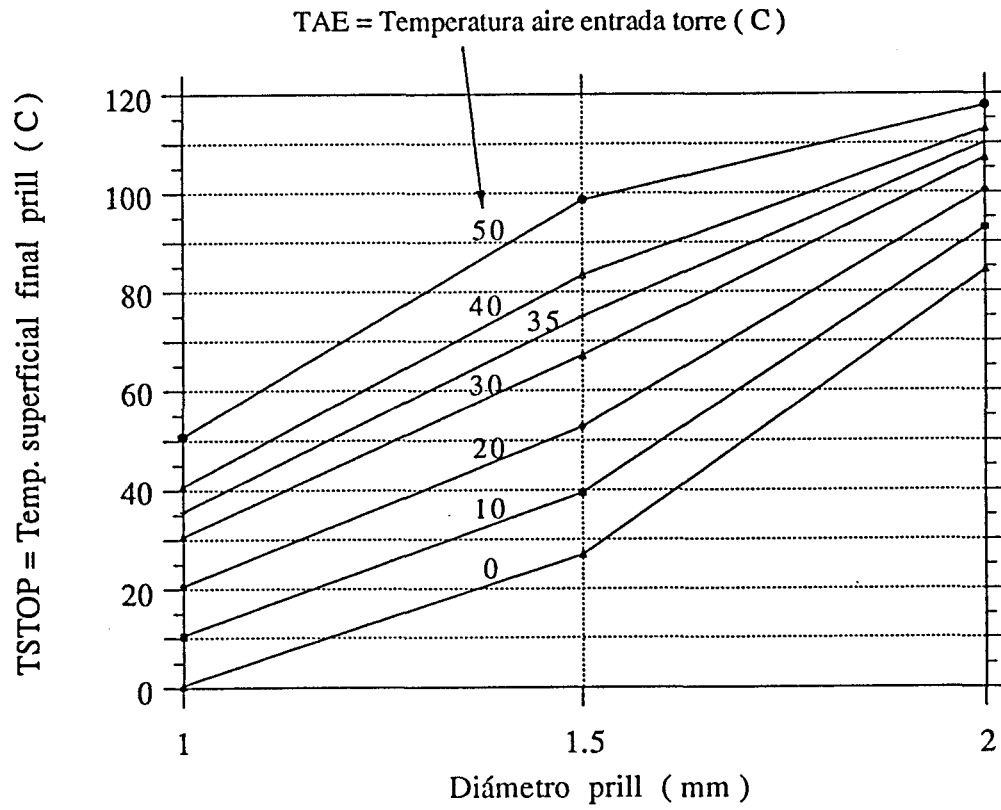


Figura 4.3-B : Simulación de torres de prilling.  
Análisis paramétrico de condiciones de operación.

Tabla de referencia : 4.17



**TABLA 4.14 : SIMULACION DE TORRES DE PRILLING**

ANALISIS PARAMETRICO DE CONDICIONES DE OPERACION :

PRODUCCION DE FERTILIZANTE (UREA)

( Valor nominal de referencia :  $\dot{m}_f = 13.815 \text{ kg/h}$  )

% Variación variable operación	Temp. aire salida torre ( C )	Temp. superf. final prill TSTOP( C )	% Variación TSTOP
- 50	41,64	71,20	- 5,1
- 40	42,94	71,92	- 4,1
- 30	44,24	72,68	- 3,1
- 20	45,52	73,43	- 2,1
- 10	46,80	74,22	- 1,0
0	48,06	75,00	0
+ 10	49,32	75,81	+ 1,1
+ 20	50,56	76,63	+ 2,2
+ 30	51,79	77,45	+ 3,3
+ 40	53,01	78,30	+ 4,4
+ 50	54,23	79,17	+ 5,6

**TABLA 4.15 : SIMULACION DE TORRES DE PRILLING**

ANALISIS PARAMETRICO DE CONDICIONES DE OPERACION :

CAUDAL DE AIRE ( ENTRADA TORRE )

( Valor nominal de referencia :  $\dot{V}_a = 304.500 \text{ m}^3/\text{h}$  )

% Variación variable operación	Temp. aire salida torre ( C )	Temp. superf. final prill TSTOP ( C )	% Variación TSTOP
- 50	59,40	88,88	+ 18,5
- 40	55,76	85,22	+ 13,6
- 30	53,08	82,06	+ 9,4
- 20	51,01	79,35	+ 5,8
- 10	49,38	77,04	+ 2,7
0	48,06	75,00	0
+ 10	46,97	73,17	- 2,4
+ 20	46,05	71,48	- 4,7
+ 30	45,27	69,93	- 6,8
+ 40	44,59	68,46	- 8,7
+ 50	44,01	67,09	- 10,5



**TABLA 4.16 : SIMULACION DE TORRES DE PRILLING**

**ANALISIS PARAMETRICO DE CONDICIONES DE OPERACION :**

**TEMPERATURA DEL AIRE (ENTRADA TORRE)**

( Valor nominal de referencia : TAE = 35 C )

TAE ( C )	% Variac. variable op.	Temp. aire salida torre ( C )	Temp. superf. final prill TSTOP ( C )	% Variación TSTOP
10	- 71,4	23,77	39,48	- 47,4
15	- 57,1	28,69	46,01	- 38,7
20	- 42,9	33,57	52,74	- 29,7
25	- 28,6	38,43	59,77	- 20,3
30	- 14,3	43,26	67,16	- 10,4
35	0	48,06	75,00	0
40	+ 14,3	52,81	83,35	+ 11,1
45	+ 28,6	57,50	91,68	+ 22,2
50 ( * )	+ 42,9	62,12	98,69 ( K = 11 )	+ 31,6

Nota \* : A una temperatura del aire a la entrada de la torre de 50 C, el programa predice que el prill de 1,5 mm de diámetro no llega completamente solidificado, a la base de la torre.

En dicha situación, no existe Sección 3 (enfriamiento prill sólido), indicándose el estado físico del prill, al final del proceso ( K = elemento o volumen de control del prill que no ha sido completamente solidificado / N = discretización prill = 50 ).  
( K = 1 centro prill, K = N superficie prill ).

**TABLA 4.17 : SIMULACION DE TORRES DE PRILLING**  
**ANALISIS PARAMETRICO DE CONDICIONES DE OPERACION :**  
**DIAMETRO DEL PRILL ( UREA ) A DIFERENTES TEMPERATURAS**  
**DEL AIRE A LA ENTRADA DE LA TORRE ( TAE )**  
 ( Valor nominal de referencia :  $D_p = 1,5 \text{ mm} / TAE = 35 \text{ C}$  )

Temp. aire entrada torre TAE ( C )	Diámetro prill $D_p$ ( mm )	Temperatura aire salida torre TAS ( C )	Temperatura superficial final del prill TSTOP ( C )	Tiempo residencia prill en torre ( s )
0	1	15,23	0,48	7,871
	1,5	13,88	26,96	5,803
	2 ( * )	10,43	84,26 ( K = 32 )	5,092
10	1	25,30	10,50	7,885
	1,5	23,77	39,48	5,709
	2 ( * )	20,07	92,88 ( K = 41 )	5,015
20	1	35,33	20,53	7,898
	1,5	33,57	52,74	5,622
	2 ( * )	29,63	100,45 ( K = 49 )	4,943
30	1	45,35	30,60	7,910
	1,5	43,26	67,16	5,541
	2 ( * )	39,07	107,03 ( K = 56 )	4,876
35	1	50,32	35,61	7,915
	1,5	48,06	75,00	5,502
	2 ( * )	43,85	110,03 ( K = 59 )	4,843
40	1	55,31	40,67	7,921
	1,5	52,81	83,35	5,465
	2 ( * )	48,57	112,78 ( K = 62 )	4,812
50	1	65,22	50,78	7,931
	1,5 ( + )	62,12	98,69 ( K = 11 )	5,397
	2 ( * )	57,94	117,65 ( K = 68 )	4,752

Nota \* : Para el caso de diámetro del prill ( $D_p$ ) de 2 mm, el programa predice que el prill llega a la base de la torre sin solidificar completamente.  
 En dicha situación, no existe Sección 3 (enfriamiento prill sólido), indicándose el estado físico del prill, al final del proceso ( K = elemento o volumen de control del prill que no ha sido completamente solidificado /  $N = \text{discretización prill} = 100$  ).  
 ( K = 1 centro prill, K = N superficie prill ).

Nota + : A una temperatura del aire a la entrada de la torre de 50 C, el programa predice que el prill de 1,5 mm de diámetro no llega completamente solidificado, a la base de la torre.  
 De forma similar al caso anterior, se indica el estado físico del prill, al final del proceso ( K = elemento o volumen de control del prill que no ha sido completamente solidificado /  $N = \text{discretización prill} = 50$  ).



2) Los parámetros o variables con mayor influencia sobre el punto de funcionamiento de una torre de prilling ( simulación ) son :

- \* Condiciones de operación : Diámetro del prill (  $D_p$  )  
Temperatura del aire a la entrada de la torre ( TAE )

Los comentarios relativos a esta constatación son lógicamente similares a los indicados en el análisis paramétrico de cálculo de torres de prilling.

Debe destacarse, no obstante, que el buen funcionamiento de una torre de prilling depende fundamentalmente del buen funcionamiento del pulverizador, como equipo generador de gotas o prills líquidos, con una granulometría estable, alrededor del diámetro nominal del prill, que espera obtenerse en la base de la torre.

3) Debido a la similitud de procesos de cálculo ( desde el punto de vista térmico ) y de resultados obtenidos, se considera que el conjunto de conclusiones indicadas, relativas al análisis paramétrico de torres de prilling tipo 2 ( pulverizador rotativo ), son implícitamente aplicables o extensibles a torres de prilling tipo 1 ( pulverizador estático ).

**CAPITULO 5 : MODELOS ANALITICOS DE CALCULO  
DE TORRES DE PRILLING**

## 5.1.- INTRODUCCION

En los capítulos 2, 3 y 4 se han presentado los modelos numéricos de cálculo y simulación de torres de prilling, objetivo de la presente tesis doctoral.

En el presente capítulo y como resultado de la investigación bibliográfica realizada, se intenta resumir y analizar la metodología existente sobre cálculo de torres de prilling y realizar, dentro de lo posible, una comparación con el método numérico desarrollado y con los datos experimentales disponibles.

Como punto previo, debe destacarse la casi inexistencia de métodos de cálculo de torres de prilling en la bibliografía, exceptuando el método analítico de Steennikel [14], que, en esencia, es el mismo que propone Honti [ 12 ].

Dicho método analítico fue originariamente deducido por los autores, para su aplicación en torres de prilling con pulverizador rotativo ( torres de prilling tipo 2 ).

Aunque su utilización podría ser, en principio, igualmente válida para torres de prilling con pulverizador estático ( tipo 1 ), se ha preferido limitar el presente estudio comparativo para el tipo de torres para las cuales el método fué concebido.

Adicionalmente, este es el tipo de torres de las cuales se dispone de datos experimentales (Cf.apartado 1.4 ).

El método analítico de Steenwinkel - Honti permite calcular el tiempo de residencia del prill en la torre, a partir de dos hipótesis básicas :

- 1) Suponer que la única resistencia térmica importante a la transmisión de calor, entre el prill y el aire, corresponde a la convección exterior prill-aire, despreciando la resistencia térmica por conducción, en el interior del prill.  
(Conductividad térmica del fertilizante prácticamente infinita ).
- 2) Aplicar la metodología de cálculo convencional de intercambiadores de calor de contacto indirecto a la torre de prilling, considerada como un intercambiador de calor a contracorriente.

A pesar de que la ecuación final de cálculo obtenida es muy simple, estas hipótesis son discutibles y, en cualquier caso, debe intentar evaluarse el nivel de exactitud de resultados que dichas suposiciones conllevan.

Para dicha finalidad, se han desarrollado dos métodos de cálculo que, en esencia, asumen la hipótesis de despreciar la conducción de calor en interior del prill, pero siguen una metodología de cálculo distinta, derivada del modelo físico de torre, dividida en tres secciones :

### 1) Modelo de referencia :

Corresponde al modelo numérico 2 de cálculo, desarrollado en el apartado 3, pero utilizando una conductividad térmica del fertilizante ( líquido y sólido ) con un valor muy grande.

Es decir a efectos de cálculo, se está despreciando la conducción en el interior del prill.

Los resultados de dicho modelo representan un punto de referencia para cualquier método analítico, que asume dicha hipótesis.

2) Modelo analítico de las 3 secciones :

Corresponde a la elaboración de un nuevo modelo analítico, que aceptando la hipótesis de despreciar la conductividad interior del prill y el modelo físico de torre de 3 secciones, permite deducir unas expresiones analíticas para el cálculo de los tiempos de residencia del prill, en cada sección de la torre.

Con la finalidad de contrastar el nivel de exactitud de estos tres modelos de cálculo, se han deducido los resultados obtenidos, en cada uno de ellos, para las condiciones de operación de la torre de prilling de urea de referencia y se han comparado con los datos experimentales disponibles.

## 5.2.- MODELO DE REFERENCIA.

### Objetivos

Deducir los resultados de cálculo del modelo numérico 2 de cálculo de torres de prilling (pulverizador rotativo), bajo las siguientes condicionantes :

- \* Datos de diseño : Similares a los de la torre de prilling de urea de referencia ( apartado 1.4 ).
- \* Hipótesis de cálculo : Resistencia térmica de conducción de calor en el interior del prill despreciable [ conducción térmica del fertilizante ( líquido , sólido ) prácticamente infinita ].

Esta hipótesis de cálculo presupone que el perfil de temperatura del prill es uniforme, en todo punto de la torre, es decir no existe gradiente de temperatura en el interior del prill (temperatura interior prill  $\approx$  temperatura superficie prill ).

Se realizará un análisis de convergencia del modelo, respecto al perfil de temperatura del prill y respecto a la altura de la torre calculada.

### Metodología de cálculo

El algoritmo de cálculo de la torre de prilling es el mismo que se ha presentado en el apartado 3.4.

### Resultados

Los resultados obtenidos, mediante el modelo numérico 2 de cálculo de torres de prilling, utilizando valores progresivamente mayores de conductividad térmica del fertilizante ( urea ), se resumen en la Tabla 5.1-A, Figura 5-1 y Tabla 5.1-B.



**TABLA 5.1 - A : RESULTADOS DE CALCULO DEL MODELO DE REFERENCIA**

Modelo de cálculo: Modelo numérico 2 de cálculo de torres de prilling (apartado 3.4)

Condiciones de operación: Similares a las de la torre de prilling de urea de referencia (apartado 1.4)

* mf	= Producción fertilizante (urea)	= 13815 kg/h
* Dp	= Diámetro del prill	= 1,5 mm
* To	= Temperatura inicial uniforme del prill	= 138 C
* TSTOP	= Temperatura superficial final prill	= 75 C
* vo	= Velocidad inicial salida prill (Punto M del pulverizador rotativo)	= 3,24 m/s
* Va	= Caudal aire a la entrada torre	= 304500 m <sup>3</sup> /h
* TAE	= Temperatura aire entrada torre	= 35 C

**ANALISIS DE CONVERGENCIA RESPECTO A LA CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL FERTILIZANTE**

F	TAS (C)	Tiempo de residencia en cada sección de la torre (s)				Altura de cada sección de la torre (m)				ε (m)	e (%)
		t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>TOT</sub>	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>	H <sub>TOT</sub>		
1	48,06	0,094	4,864	0,545	5,502	0,042	28,980	3,541	32,563	0	0
2	48,15	0,151	4,225	0,893	5,269	0,107	25,130	5,805	31,042	-1,521	-4,6
5	48,21	0,230	3,739	1,154	5,123	0,241	22,337	7,506	30,085	-2,478	-7,6
10	48,23	0,267	3,538	1,265	5,071	0,322	21,290	8,235	29,748	-2,815	-8,6
100	48,24	0,302	3,310	1,409	5,021	0,406	19,840	9,172	29,419	-3,144	-9,7
1000	48,24	0,305	3,273	1,437	5,015	0,415	19,611	9,356	29,382	-3,181	-9,8
10000	48,24	0,306	3,266	1,442	5,015	0,416	19,572	9,391	29,379	-3,184	-9,8
100000	48,24	0,306	3,265	1,443	5,015	0,416	19,565	9,397	29,379	-3,184	-9,8

Nomenclatura:

F = Factor de multiplicación de la conductividad térmica del fertilizante sólido y líquido (urea)

λ<sub>L</sub> = Conductividad térmica urea líquida (132,7 C) = 0,33 kcal / h m C = 0,38 W / m C

λ<sub>S</sub> = Conductividad térmica urea sólida = 0,43 kcal / h m C = 0,50 W / m C

TAS = Temperatura aire salida torre

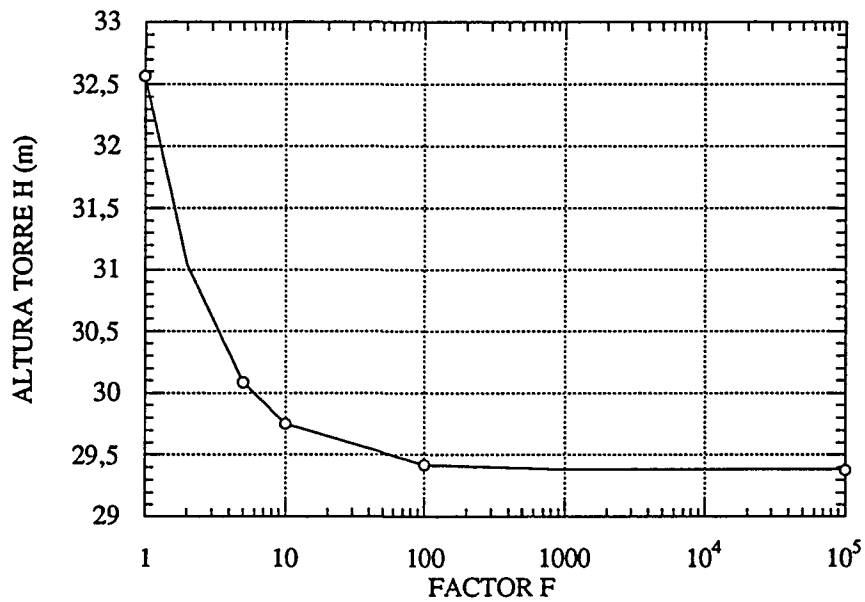
$$\epsilon = \frac{H_{TOT}^F - H_{TOT}^{F=1}}{H_{TOT}^F} = \text{Desviación absoluta de la altura calculada de la torre respecto a la altura de referencia (F = 1)}$$

$$e = \frac{\epsilon}{H_{TOT}^F} = \text{Desviación relativa de la altura calculada de la torre respecto a la altura de referencia (F = 1)}$$

**DESVIACION RESPECTO A VALORES EXPERIMENTALES**

Resultados	TAS (C)	t <sub>TOT</sub> (s)	H <sub>TOT</sub> (m)	ε (m)	e (%)
Experimental	48,43	-	33,7	0	0
Modelo referencia (F = 100000)	48,24	5,015	29,38	-4,32	-12,8

FIGURA 5.1 : Modelo de referencia. Influencia de la conductividad tèrmica del prill sobre la altura de la torre calculada.



F = Factor multiplicativo de  $\lambda_L$  y  $\lambda_S$

**Tabla 5.1-B : Resumen de resultados del modelo de referencia.**  
**Estimación del coeficiente medio de transmisión de calor por convección prill-aire.**

Hipótesis de cálculo : F = 100.000 (Factor multiplicativo conductividad térmica prill)

Coefficiente transmisión calor por convección prill - aire (kcal / h.m<sup>2</sup>.C)

Esquema torre prilling	Punto	Temperatura aire		Velocidad prill v <sub>p</sub> (m / s)	h	Tiempo t (sec)	Altura torre H (m)
		Temp. prill T <sub>p</sub> (C)	Ta (C)				
	4	138	48,24	3,24	174,4	0,306	0,416
	3	132,7	47,58	3,531	190,9	1,647	3,265
	3*	132,7	43,04	6,499	242,7	1,618	19,565
	2	132,7	38,04	6,528	242,9	1,443	9,397
1	75	35	6,496	241,4	5,014	29,378	

Especificaciones de cálculo :

- \* El perfil de temperatura del prill, obtenido por cálculo, es prácticamente uniforme, no apareciendo gradiente de temperatura en el interior del prill ( T centro prill = T superficie prill ).
- \* El punto 3 \* corresponde al punto de la torre, donde el coeficiente h , después de adquirir valores progresivamente crecientes, alcanza el valor ( 242,7 kcal / h.m<sup>2</sup>.C ), que va a mantenerse prácticamente constante, hasta la base de la torre.
- \* A partir de la información indicada del coeficiente h, puede estimarse el valor medio de dicho coeficiente respecto al tiempo, en cada sección de la torre.

Sección torre	Cálculo del coeficiente h medio respecto al tiempo
1	$\bar{h}_1 = -(174,4 + 190,9) / 2 = \underline{183 \text{ kcal / h.m}^2.C}$ ←
2	$\bar{h}_2 = \frac{190,9 + 242,7}{2} \cdot \frac{1,647}{3,265} + \frac{242,7 + 242,9}{2} \cdot \frac{1,618}{3,265} = \underline{230 \text{ kcal / h.m}^2.C}$ ↙
3	$\bar{h}_3 = (242,9 + 241,4) / 2 = \underline{242 \text{ kcal / h.m}^2.C}$ ←
1 + 2 + 3	$\bar{h} = \frac{183 \times 0,306 + 230 \times 3,265 + 242 \times 1,443}{5,014} = \underline{231 \text{ kcal / h.m}^2.C}$ ←

## Conclusiones previas

- 1) Los resultados de cálculo obtenidos, mediante el modelo numérico 2, permiten deducir el nivel de convergencia de dichos resultados, en función del valor del factor F.

Factor F	Convergencia respecto a la altura H	Convergencia respecto a la perfil de temperaturas
10	+ 1,3 %	- 8,2 %
100	+ 0,14 %	- 1,6 %
1000	<u>+ 0,01 %</u>	- 0,3 %
10.000	< 0,01 %	- 0,05 %
100.000	0 %	<u>- 0,01 %</u>

F : Factor multiplicativo de la conductividad térmica del fertilizante ( urea ) líquido y sólido.

Convergencia respecto a H : Desviación relativa de la altura de cálculo respecto a la altura de referencia o convergencia ( F = 100.000 ).

Convergencia respecto al perfil de temperatura : Desviación relativa de la temperatura superficial del prill, respecto a la temperatura central del prill, al final de la sección 2.

( Se considera dicho perfil de temperatura como el más representativo del proceso, de cara al análisis de convergencia ).

Si se elige un nivel de convergencia del orden de 0,01 %, puede deducirse que el método converge, respecto a la altura, para un valor de F = 1000, y , respecto al perfil de temperatura, para un valor de F = 100.000.

El análisis de dichos resultados, así como los indicados en la tabla 5.1-A y figura 5.1, permite deducir que la hipótesis de desprestigiar la resistencia térmica de conducción en el interior del prill, supone una desviación de la altura calculada ( F > 1000 ) del - 9,8 %, respecto a la altura calculada, sin considerar dicha hipótesis ( F = 1 ).

Así mismo, dicha hipótesis presupone obtener desviaciones negativas respecto a la altura experimental ( - 12,8 % ).

Estos resultados de cálculo son, en principio, lógicos, ya que, si se desprestigiar una de las 2 resistencias térmicas del proceso, cabe esperar un mayor flujo de calor del prill al aire, un menor tiempo de proceso y en consecuencia una menor altura de la torre.

- 2) En la Tabla 5.1-B, se ha realizado, el cálculo del coeficiente medio de transmisión de calor por convección de prill-aire, respecto al tiempo, para cada sección de la torre, así como el coeficiente medio de toda la torre.

Dichos parámetros sólo son deducibles, a partir de un método de cálculo tramo a tramo (  $\Delta t$  en  $\Delta t$  ), y serán utilizados posteriormente para el método analítico de Steenwinkel ( apartado 5.3 ) y para el modelo analítico de las tres secciones ( apartado 5.4 ).

### 4.3.- MODELO ANALITICO DE STEENWINKEL-HONTI.

#### Objetivos

Presentar, de forma resumida, el modelo analítico de Steenwinkel-Honti para el cálculo de torres de prilling, especificando las hipótesis y variables básicas de cálculo.

Deducir los resultados de cálculo de dicho modelo analítico para las condiciones de operación de la torre de prilling de urea de referencia ( apartado 1.4 ), contrastando dichos resultados con los datos experimentales disponibles.

Analizar el nivel de exactitud del modelo y el nivel de validez de las hipótesis de cálculo.

#### Metodología de cálculo

El modelo analítico de cálculo de torres de prilling que propone Steenwinkel [ 14 ] es muy similar al que propone Honti [ 12 ], y se basa en las siguientes hipótesis de cálculo :

- a) Se desprecia la resistencia térmica por conducción de calor en el interior del prill ( el perfil de temperatura del prill es uniforme a lo largo de la torre ).
- b) La densidad del prill se considera constante. (  $\rho_{\text{líquido}} = \rho_{\text{sólido}}$  ).
- c) Se acepta la metodología convencional de cálculo de intercambiadores de calor de contacto indirecto ( método DTLM ) para la torre de prilling.
- d) En las ecuaciones de balance de energía entre el prill y el aire, se considera al prill como si no sufriera cambio de fase.

A partir de estas hipótesis, puede dimensionarse la torre de prilling, siguiendo un proceso de cálculo, dividido en 2 etapas :

- 1) Determinar el tiempo de residencia del prill en la torre, mediante una expresión analítica muy simple, cuya deducción se resume en el Anexo 5.1 :

$$t = \frac{D_p \rho \Delta H}{6 \bar{h} \Delta T_{lm}} \quad (\text{Ec. 5.5})$$

#### Especificaciones :

- t = Tiempo de residencia del prill en la torre.
- D<sub>p</sub> = Diámetro del prill.
- ρ = Densidad del prill.
- ΔH = Cambio de entalpía específica del prill, asociado a su proceso de solidificación.
- $\bar{h}$  = Coeficiente medio de transmisión de calor por convección prill-aire.
- ΔT<sub>lm</sub> = Diferencia temperatura logarítmica media entre el prill y el aire.

- 2) Estimar la altura de la torre, determinando la caída vertical que habrá recorrido el prill, después del tiempo de residencia calculado en la etapa anterior.

Esta metodología de cálculo fué originariamente deducida por los autores para su utilización en torres de prilling con pulverizador rotativo ( tipo 2 ).

En consecuencia y tal como se ha visto previamente, ( apartado 3.3 ), la estimación de la altura de la torre no podrá realizarse, mediante una expresión analítica, sino que se requerirá un método numérico de cálculo por ordenador, que permita determinar la trayectoria del prill.

Dicho programa ya ha sido elaborado en el apartado 3.3 ( Programa TRAJ ) y será utilizado aquí para la aplicación del método de Steenwinkel-Honti.

Adicionalmente existe otro condicionante importante relativo al coeficiente de transmisión de calor por convección prill-aire ( h ), el cual es un parámetro básico en la determinación del tiempo de residencia del prill ( cf. Ec. 5.1 ).

En una torre con pulverizador rotativo, dicho coeficiente no puede ser considerado constante, ya que tampoco lo es la velocidad del prill respecto al aire.

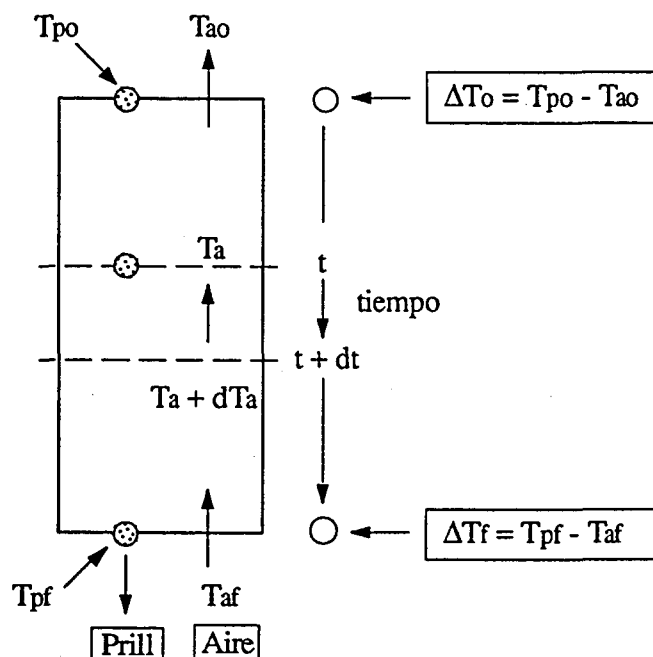
En la Ec. 5.1, deberá utilizarse un coeficiente medio respecto al tiempo, tal como puede inferirse de la deducción de la expresión analítica de temperatura ( cf. Anexo 5.1, Ec. 5.3 ).

Este valor medio de h no es deducible, a partir del modelo de Steenwinkel, sino que debe estimarse, a partir de un modelo numérico que realice el tratamiento tramo a tramo (  $\Delta t$  en  $\Delta t$  ) del proceso de transmisión de calor prill-aire.

Este cálculo ya ha sido realizado previamente, mediante el modelo de referencia ( apartado 5.2, tabla 5.1-B ), obteniendo un valor medio de h para toda la torre de :

$$\bar{h} = 231 \text{ kcal / h.m}^2 \text{ C} = 269 \text{ W / m}^2 \text{ C}$$

**Anexo 5.1 : Deducción de la ecuación de cálculo del tiempo de residencia del prill en la torre (Modelo STEENWINKEL - HONTI) [12,14]**



**Hipótesis de cálculo:**

1) Resistencia térmica por conducción de calor en el interior del prill despreciable  
(Perfil de T uniforme,  $\forall$  tiempo)

2) Densidad del prill = cte

3) Balance energía prill-aire (aproximación aceptada):

$$\dot{Q} = \dot{m}_p \left[ c_{pL} \Delta T_L + \Lambda + c_{pS} \Delta T_S \right]$$

$$\dot{Q} \cong \dot{m}_p c_p \Delta T$$

(Tpo - Tpf)

TS = Temperatura solidificación prill

1) Balance de energía prill-aire entre 0 y t:

$$\dot{Q} = \frac{\dot{m}_p c_p}{C_p} (T_{po} - T_p) = \frac{\dot{m}_a c_a}{C_a} (T_{ao} - T_a) \quad [\text{Kcal/h, W}]$$

Diferenciando :  $d\dot{Q} = -C_p dT_p = -C_a dT_a$

operando se llega a :

$$\boxed{d\dot{Q} = \frac{-d(T_p - T_a)}{M}} \quad (\text{Ec. 5.1})$$

$$M = \frac{1}{C_p} - \frac{1}{C_a}$$

Integrando entre 0 y t se obtiene :

$$\boxed{M = \frac{\Delta T_o - \Delta T_f}{\dot{Q}}} \quad (\text{Ec. 5.2})$$

2) Balance de energía durante dt :

Balance energía prill - aire
Transmisión calor prill - aire

$$d\dot{Q} = \frac{-d(T_p - T_a)}{M} = A_p NP h (T_p - T_a) dt$$

$$\int_{\Delta T_0}^{\Delta T_f} \frac{d(T_p - T_a)}{(T_p - T_a)} = - \int_0^t A_p NP h M dt$$

$\bar{h} = h \text{ medio entre } 0 \text{ y } t$

$$\text{Ln} \frac{\Delta T_f}{\Delta T_0} = - A_p NP \bar{h} M t$$

Sustituyendo el valor de M, obtenido en la Ec. 5.2, y operando se llega a:

$$\dot{Q} = A_p NP \bar{h} t \frac{\Delta T_f - \Delta T_0}{\ln \frac{\Delta T_f}{\Delta T_0}}$$

$\dot{Q} = A_p NP \bar{h} t \Delta T_{lm}$

(Ec. 5.3)

Calor total transferido del prill al aire

El balance de energía total, entre la entrada y la salida de la torre, permitirá deducir otra expresión del calor total transferido del prill al aire :

$$\dot{Q} = \dot{m}_p [c_{pL} (T_{po} - T_s) + \Lambda + c_{pS} (T_s - T_{pf})]$$

$\dot{m}_p = NP \times V_p \times \rho$  (caudal másico fertilizante)

$\dot{Q} = NP \times V_p \times \rho \times \Delta H$

(Ec. 5.4)

Igualando las ecuaciones 5.3 y 5.4, y operando se llega a la expresión del tiempo de residencia del prill en la torre :

$t = \frac{D_p}{6} \frac{\rho \Delta H}{\bar{h} \Delta T_{lm}}$

(Ec. 5.5)

[m]
[kg / m<sup>3</sup>]
[J / kg]

[s]
[W / m<sup>2</sup> C]
[C]



Especificaciones :

$t$  = Tiempo de residencia prill en la torre

$D_p$  = Diámetro del prill

$\rho$  = Densidad del prill (= cte)

$\Delta H$  = Cambio entalpía específica del prill, asociado al proceso de solidificación

$\bar{h}$  =  $c_{pL}(T_{po} - T_S) + \Lambda + c_{pS}(T_S - T_{pf})$

$\bar{h}$  = Coeficiente medio de transmisión de calor por convección prill - aire

$\Delta T_{lm}$  = Diferencia temperatura logarítmica media prill-aire

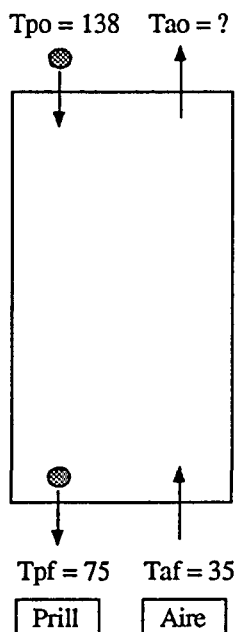
$$= \frac{\Delta T_o - \Delta T_f}{\ln \frac{\Delta T_o}{\Delta T_f}} \quad \rightarrow \quad \Delta T_o = T_{po} - T_{ao} \quad (\text{Parte superior torre})$$

$$\quad \rightarrow \quad \Delta T_f = T_{pf} - T_{af} \quad (\text{Parte inferior torre})$$

## Resultados

Los resultados de cálculo, mediante la utilización del método de Steenwinkel-Honti, para las condiciones de operación de la torre de prilling de urea de referencia, se resumen a continuación.

### Condiciones de operación de la torre de prilling



$$\dot{m}_p = \text{caudal másico fertilizante} = 13.815 \text{ kg/h}$$

$$D_p = \text{diámetro prill} = 1,5 \text{ mm.}$$

$$\rho = \text{densidad urea} = 1330 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m}_a = \text{caudal másico aire} = 348.653 \text{ kg/h}$$

### Cálculos

#### \* Estimación de la temperatura del aire a la salida de la torre (Tao)

$$\dot{Q} = \dot{m}_a c_{p_a} (T_{ao} - T_{af}) = \dot{m}_p [c_{p_L} (T_{po} - T_{ps}) + \Lambda + c_{p_S} (T_s - T_{pf})]$$

$$\Delta H = 0,76 (138 - 132,7) + 57,8 + 0,32 (132,7 - 75) = 80,292 \text{ kcal/kg} = 335.942 \text{ J/kg}$$

$$\dot{Q} = 348.653 \times 0,24 (T_{ao} - 35) = 13.815 \times 80,292$$

$$T_{ao} = 48,24 \text{ C}$$

#### \* Cálculo del tiempo de residencia del prill

$$\bar{h} = 269 \text{ w/m}^2 \cdot \text{C} \text{ (deducido en apartado 5.2, Tabla 5.1-B)}$$

$$\Delta T_o = T_{po} - T_{ao} = 138 - 48,24 = 89,76 \text{ C}$$

$$\Delta T_f = T_{pf} - T_{af} = 75 - 35 = 40 \text{ C}$$

$$\Delta T_{lm} = (\Delta T_o - \Delta T_f) / \ln (\Delta T_o / \Delta T_f) = 61,56 \text{ C}$$

$$t = \frac{D_p \rho \Delta H}{6 \bar{n} \Delta T_{lm}} = \frac{(1,5 \times 10^{-3}) \times 1330 \times 335.942}{6 \times 269 \times 61,56} = 6,76 \text{ sec}$$

\* Estimación de la altura de la torre mediante el programa TRAJ ( apartado 3.3 )

### 1.- Datos de operación

$$T_a = \text{Temperatura media aire} = (48,24 + 35) / 2 = 41,62 \text{ C}$$

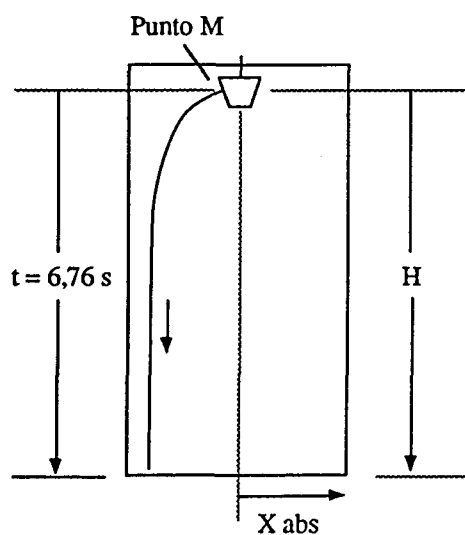
$$\bar{v}_a = \text{Velocidad media ascensión aire} = 0,715 \text{ m/s}$$

$$D_p = \text{Diámetro prill} = 1,5 \text{ mm.}$$

$$v_o = \text{Velocidad inicial prill} = 3,24 \text{ m/s (Punto M del pulverizador rotativo)}$$

$$t = \text{Tiempo residencia prill en torre} = 6,76 \text{ sec.}$$

### 2.- Resultados del programa TRAJ



#### Simbología

$\Delta t$  = Incremento tiempo cálculo

$t$  = Tiempo residencia prill en torre

$X \text{ abs}$  = Alcance del prill

$H$  = Altura torre calculada

$H \text{ exp}$  = Altura torre experimental

$\epsilon$  = Desviación absoluta de la altura calculada respecto a altura experimental

$e$  = Desviación relativa de la altura calculada respecto a altura experimental

Datos Programa		Resultados Programa			
$\Delta t$ (sec)	$t$ (sec)	$X \text{ abs}$ (m)	$H$ (m)	$\epsilon = H - H \text{ exp}$ (m)	$e = \epsilon / H \text{ exp}$
0,01	6,76	2,84	40,85	$40,85 - 33,7 = 7,15$	+ 21,2 %

## Conclusiones previas

- 1) Los resultados de cálculo de la torre de prilling de referencia, utilizando el modelo de Steenwinkel-Honti, demuestran que se obtiene un valor calculado de la altura de torre sobredimensionada en + 21 %, respecto al valor experimental.

En este sentido, puede deducirse que dicho modelo es, en principio, un método de cálculo conservador, tendente a sobredimensionar la torre de prilling.

- 2) Los resultados de cálculo del modelo de referencia ( apartado 5.2, tabla 5.1-A ) permiten deducir que, la hipótesis de despreciar la conducción de calor en el interior del prill, conduce a obtener una altura de torre, subdimensionada en un 12,8 %, respecto al valor experimental.

Este resultado representa un buen punto de referencia para poder deducir o cuantificar la importante influencia del resto de hipótesis de modelo de Steenwinkel-Honti ( metodología convencional de intercambiadores de calor, ecuación de balance de energía del prill sin cambio de fase ).

En este sentido, puede afirmarse que el conjunto de hipótesis de cálculo del modelo de Steenwinkel-Honti son, en principio, bastante discutibles.

- 3) Uno de los puntos más conflictivos del método de Steenwinkel-Honti es la determinación del valor medio del coeficiente de transmisión de calor por convección prill-aire respecto al tiempo (  $\bar{h}$  ), el cual es un parámetro importante en la determinación del tiempo de residencia del prill en la torre ( cf. Ec. 5.5 ).

Dicho parámetro no es deducible, a partir del modelo Steenwinkel, sino que ha debido estimarse, a partir del modelo numérico de referencia.

En este sentido, resulta, en principio, contradictorio que, para utilizar un modelo analítico de cálculo, sea preciso determinar previamente una de sus variables básicas de cálculo (h), mediante un modelo numérico.

Una alternativa a este problema sería determinar el tiempo total de residencia del prill, mediante el modelo de Steenwinkel-Honti, utilizando un proceso de cálculo tramo a tramo (  $\Delta t$  en  $\Delta t$  ), situación que permitirá determinar asimismo el coeficiente h en cada tramo.

No obstante esta alternativa convertiría el modelo analítico en un método seminumérico, similar al modelo de referencia, desarrollado en el apartado 5.2.

## 5.4.- MODELO ANALITICO DE LAS 3 SECCIONES.

### Objetivos

Desarrollar el modelo analítico de cálculo de torres de prilling, siguiendo el modelo físico de torre, dividida en 3 secciones, y aceptando unas hipótesis de cálculo, menos restrictivas que las del modelo de Steenwinkel-Honti. ( cf. apartado 5.3 ).

Deducir los resultados de cálculo de dicho modelo analítico para las condiciones de operación de la torre de prilling de urea de referencia, contrastando dichos resultados con los datos experimentales disponibles.

Analizar el nivel de exactitud de modelo y el nivel de validez de las hipótesis de cálculo.

### Metodología de cálculo

El método analítico de cálculo de torres de prilling que se propone, puede considerarse una simplificación del modelo numérico desarrollado en la presente tesis doctoral, basada en las siguientes hipótesis de cálculo :

a) Se acepta el modelo físico de torres de prilling, dividida en 3 secciones :

-Sección 1: Enfriamiento del prill líquido.

-Sección 2 : Solidificación del prill.

-Sección 3 : Enfriamiento del prill sólido.

Esta hipótesis permite considerar al fenómeno de prilling, como un proceso de 3 etapas sucesivas, cada una de las cuales con un coeficiente medio de transmisión de calor por convección prill-aire ( $\bar{h}_1$ ,  $\bar{h}_2$  y  $\bar{h}_3$ ) y un tiempo de residencia ( $t_1$ ,  $t_2$  y  $t_3$ ).

b) Se desprecia la resistencia térmica por conducción de calor en el interior del prill ( el perfil de temperatura del prill es uniforme a lo largo de la torre ).

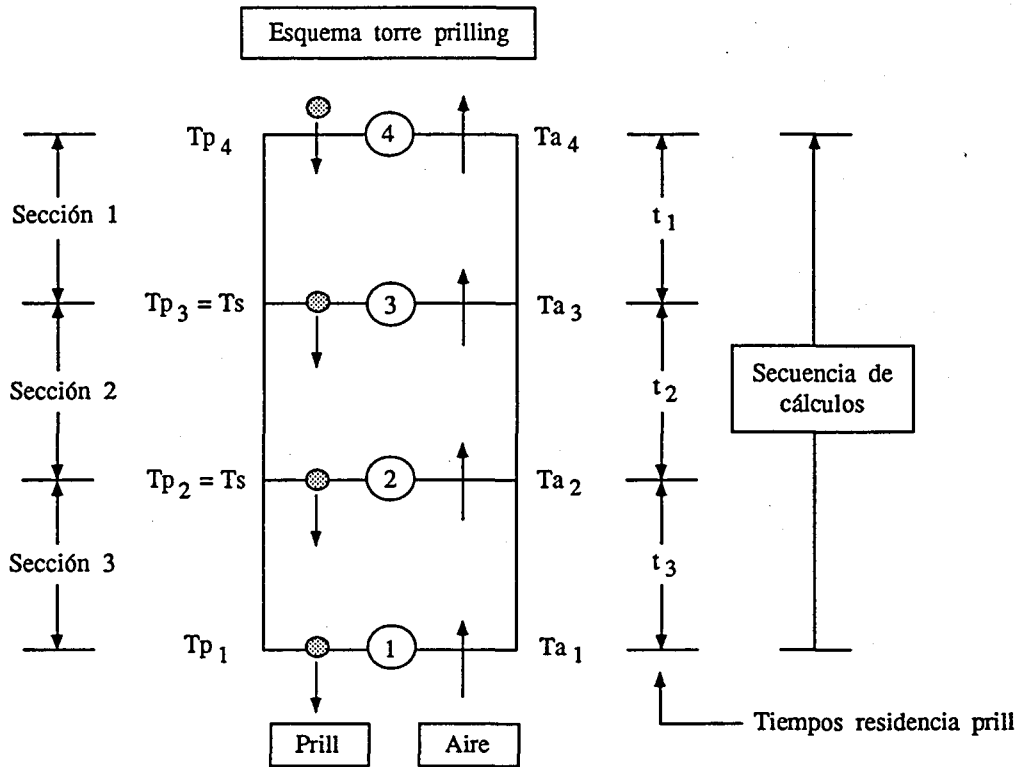
c) La densidad del prill se considera constante ( $\rho_{\text{líquido}} = \rho_{\text{sólido}}$ )

Aunque en principio, el método será igualmente aplicable, tanto para torres de prilling de tipo 1 ( pulverizador estático ), como de tipo 2 ( pulverizador rotativo ), se ha restringido su aplicación a este último tipo de torres, de forma similar a como se ha hecho con los modelos anteriores ( modelo de referencia y modelo de Steenwinkel-Honti ).

A partir de estas consideraciones y de las hipótesis de cálculo indicadas, de dimensionado de la torre de prilling puede realizarse, según un proceso de cálculo en dos etapas, de forma similar al modelo Steenwinkel :

- 1) Determinación del tiempo de residencia del prill en cada sección de la torre ( $t_1$ ,  $t_2$  y  $t_3$ ), mediante las expresiones analíticas deducidas en el Anexo 5.2.
- 2) Determinación de la altura de la torre de prilling, a partir del tiempo de residencia total del prill ( $t = t_1 + t_2 + t_3$ ), utilizando el program de cálculo TRAJ ( cf. apartado 3.3 ).

**Anexo 5.2 : Deducción de las ecuaciones del cálculo del tiempo de residencia del prill en cada sección de la torre ( Método analítico de las 3 secciones ).**



DATOS DEL PROCESO

- \*  $\dot{m}_p$  = Producción fertilizante
- \*  $D_p$  = Diámetro prill
- \*  $\dot{m}_a$  = Caudal másico aire
- \* Temperaturas :
  - Fertilizante :  $Tp_4, Tp_3 = Tp_2 = Tps, Tp_1$
  - Aire :  $Ta_1$

ETAPAS DE CALCULO

ETAPA A : Determinación de las temperaturas intermedias y final del aire ( $Ta_2, Ta_3, Ta_4$ ), a partir de las ecuaciones de balance de energía prill - aire.

ETAPA B : Determinación de los tiempos de residencia del prill en cada sección de la torre ( $t_1, t_2, t_3$ ), a partir de las ecuaciones de balance de energía y transmisión de calor prill - aire.

Etapa A : Determinación de las temperaturas intermedias y final del aire

\* Sección 3 : Enfriamiento prill sólido

Balance de energía prill - aire :  $\dot{Q}_3 = \frac{\text{calor absorbido por aire}}{\dot{m}_a c_{p_a}} (T_{a_2} - T_{a_1}) = \frac{\text{calor cedido por prill}}{\dot{m}_p c_{p_s}} (T_{p_2} - T_{p_1})$

$$T_{a_2} = \frac{\dot{m}_p c_{p_s}}{\dot{m}_a c_{p_a}} (T_{p_2} - T_{p_1}) + T_{a_1} \quad (\text{Ec. 5.6})$$

\* Sección 2 : Solidificación prill

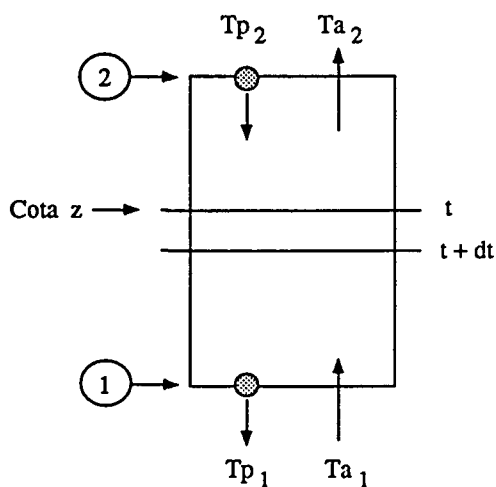
Balance de energía prill - aire :  $\dot{Q}_2 = \frac{\text{calor absorbido por aire}}{\dot{m}_a c_{p_a}} (T_{a_3} - T_{a_2}) = \frac{\text{calor cedido por prill}}{\dot{m}_p \Lambda}$

$$T_{a_3} = \frac{\dot{m}_p \Lambda}{\dot{m}_a c_{p_a}} + T_{a_2} \quad (\text{Ec. 5.7})$$

\* Sección 1 : Enfriamiento prill líquido

Balance de energía prill - aire :  $\dot{Q}_1 = \frac{\text{calor absorbido por aire}}{\dot{m}_a c_{p_a}} (T_{a_4} - T_{a_3}) = \frac{\text{calor cedido por prill}}{\dot{m}_p c_{p_L}} (T_{p_4} - T_{p_3})$

$$T_{a_4} = \frac{\dot{m}_p c_{p_L}}{\dot{m}_a c_{p_a}} (T_{p_4} - T_{p_3}) + T_{a_3} \quad (\text{Ec. 5.8})$$

**Etapa B : Determinación de los tiempos de residencia del prill en cada sección**
**\* Sección 3 : Enfriamiento prill sólido**


\* Balance energía durante dt :

$$\text{transmisión calor prill - aire} = \text{calor absorbido por aire}$$

$$A_p NP h_3 (T_p - T_a) dt = \dot{m}_a c_{p_a} dT_a \quad (\text{Ec. 5.9})$$

\* Balance energía entre cota z y 1 :

$$\text{calor cedido por prill} = \text{calor absorbido por aire}$$

$$\dot{m}_p c_{p_S} (T_p - T_{p1}) = \dot{m}_a c_{p_a} (T_a - T_{a1}) \quad (\text{Ec. 5.10})$$

Combinando las ecuaciones 5.9 y 5.10 se llega a :

$$dt = \frac{\dot{m}_a c_{p_a} dT}{A_p NP h_3 [(S-1)T_a - S T_{a1} + T_{p1}]} \quad \text{con } S = \frac{\dot{m}_a c_{p_a}}{\dot{m}_p c_{p_S}}$$

Integrando entre  $t=0$  y  $t=t_3$ , se deduce la expresión de cálculo del tiempo de residencia del prill en la sección 3 :

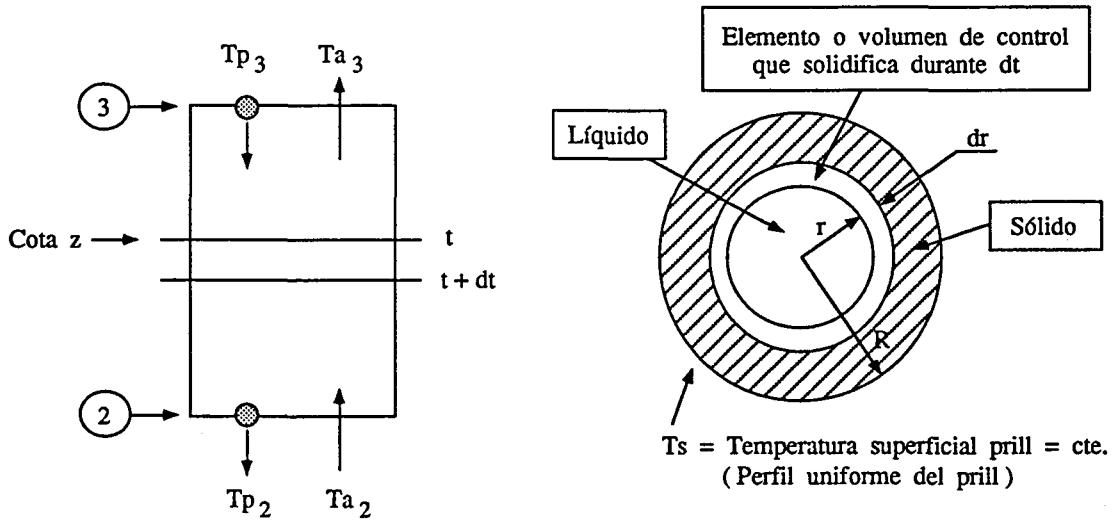
$$t_3 = \frac{\dot{m}_a c_{p_a}}{(S-1) A_p NP \bar{h}_3} \text{Ln} \left[ \frac{(S-1)(T_{a2} - T_{a1})}{(T_{p1} - T_{a1})} + 1 \right]$$

$$S = \frac{\dot{m}_a c_{p_a}}{\dot{m}_p c_{p_S}}$$

(Ec. 5.11)



\* Sección 2 : Solidificación prill



\* Balance energía durante dt :

transmisión calor prill - aire = calor generado por solidificación del volumen de control  $dr$  durante  $dt$

$$A_p h_2 (T_p - T_a) dt = - \rho 4 \pi r^2 dr \Lambda \quad (\text{kcal/prill}, \text{kJ/prill}) \quad (\text{Ec. 5.12})$$

\* Balance energía entre cota z y 2 :

calor absorbido por aire = calor generado por solidificación prill

$$\dot{m}_a c_{p_a} (T_a - T_{a_2}) = NP \frac{4}{3} \pi r^3 \rho \Lambda \quad (\text{kcal/h}, \text{kW}) \quad (\text{Ec. 5.13})$$

Combinando las ecuaciones 5.12 y 5.13 se llega a :

$$dt = \frac{-4 \pi \rho \Lambda}{h_2 A_p} \frac{r^2 dr}{T_p - \frac{\dot{m}_p \Lambda}{\dot{m}_a c_{p_a}} - T_{a_2}}$$

Integrando entre  $t=0$  ( $r=R$ ) y  $t=t_2$  ( $r=0$ ), se deduce la expresión de cálculo del tiempo de residencia del prill en la sección 2 :

$$t_2 = \frac{\dot{m}_a c_{p_a}}{A_p NP \bar{h}_2} \ln \left[ \frac{T_s - T_{a_2}}{T_s - \frac{\dot{m}_p \Lambda}{\dot{m}_a c_{p_a}} - T_{a_2}} \right] \quad (\text{Ec. 5.14})$$

\* Sección 1 : Enfriamiento prill líquido

Realizando un análisis similar al desarrollado en la sección 3, se llega a la expresión de cálculo del tiempo de residencia del prill en la sección 1 :

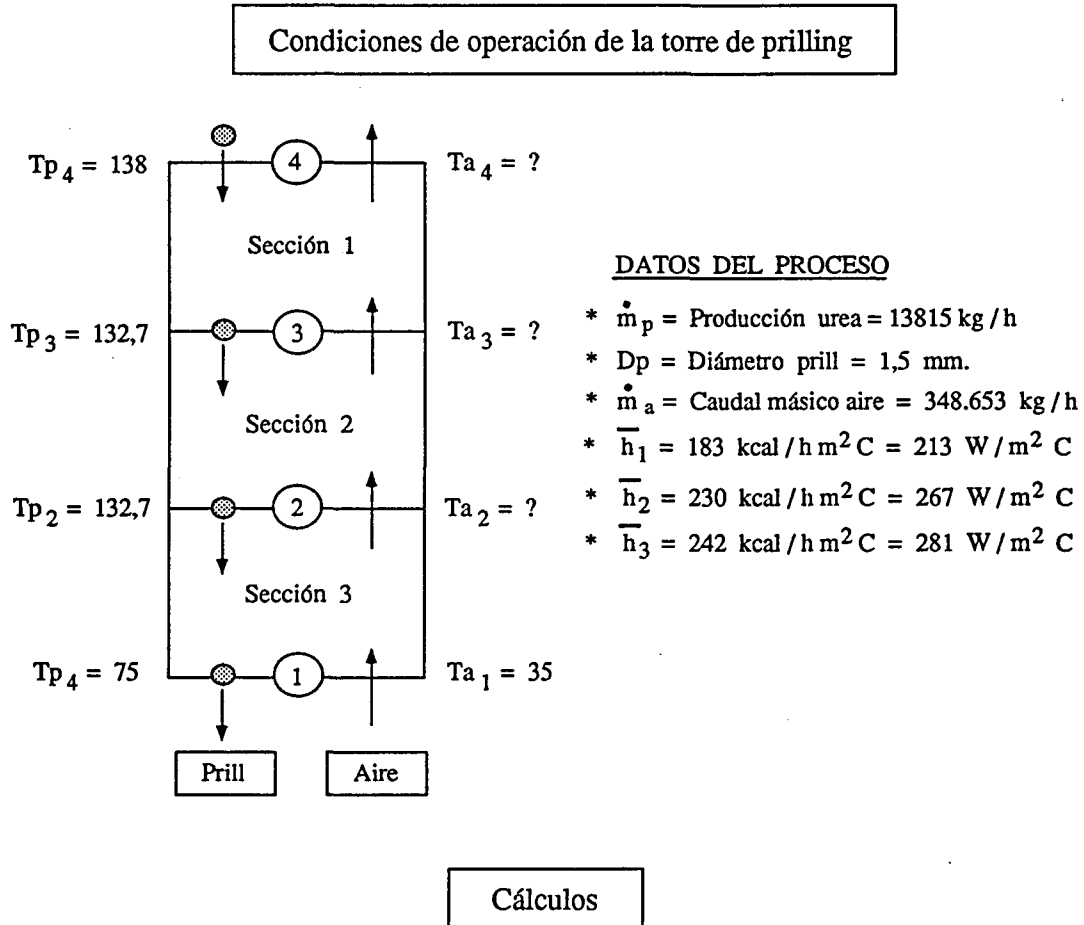
$$t_1 = \frac{\dot{m}_a c_{p_a}}{(L-1) A_p N_P \bar{h}_1} \text{Ln} \left[ \frac{(L-1)(T_{a_4} - T_{a_3})}{(T_s - T_{a_1})} + 1 \right]$$

$$L = \frac{\dot{m}_a c_{p_a}}{\dot{m}_p c_{p_L}}$$

(Ec. 5.15)

## Resultados

Los resultados de cálculo del modelo analítico de las 3 secciones, para las condiciones de operación de la torre de prilling de urea de referencia, se resumen a continuación.



\* Cálculo de las temperaturas de aire :

$$\underline{Ta_2} = \frac{\dot{m}_p \cdot cp_S}{\dot{m}_a \cdot cp_a} (Tp_2 - Tp_1) + Ta_1 = \frac{13.815 \times 0,32}{348.653 \times 0,24} (132,7 - 75) + 35 = \underline{38,05 \text{ C}} \leftarrow$$

$$\underline{Ta_3} = \frac{\dot{m}_p \cdot \Lambda}{\dot{m}_a \cdot cp_a} + Ta_2 = \frac{13.815 \times 57,8}{348.653 \times 0,24} + 38,05 = \underline{47,59 \text{ C}} \leftarrow$$

$$\underline{Ta_4} = \frac{\dot{m}_p \cdot cp_L}{\dot{m}_a \cdot cp_a} (Tp_4 - Tp_3) + Ta_3 = \frac{13.815 \times 0,76}{348.653 \times 0,24} (138 - 132,7) + 47,59 = \underline{48,24 \text{ C}} \leftarrow$$

\* Cálculo del tiempo de residencia del prill en cada sección :

$$A_p = \text{Superficie exterior prill} = 4 \pi R^2 = 4 \pi (0,75 \times 10^{-3})^2 = 7,0686 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{prill}$$

$$V_p = \text{Volumen prill} = (4/3) \pi R^3 = (4/3) \pi (0,75 \times 10^{-3})^3 = 1,7671 \times 10^{-9} \text{ m}^3 / \text{prill}$$

$$m = \text{masa prill} = V_p \rho = 1,7671 \times 10^{-9} \times 1330 = 2,3502 \times 10^{-6} \text{ kg} / \text{prill}$$

$$NP = \dot{m}_p / m = (13815 / 3600) / (2,3502 \times 10^{-6}) = 1,6238 \times 10^6 \text{ prill} / \text{s}$$

$$S = \frac{\dot{m}_a c_{p_a}}{\dot{m}_p c_{p_s}} = \frac{348,653 \times 0,24}{13,815 \times 0,32} = 18,928$$

$$L = \frac{\dot{m}_a c_{p_a}}{\dot{m}_p c_{p_L}} = \frac{348,653 \times 0,24}{13,815 \times 0,76} = 7,9697$$

$$t_3 = \frac{\dot{m}_a c_{p_a}}{(S-1) A_p NP \bar{h}_3} \text{Ln} \left[ \frac{(S-1)(T_{a_2} - T_{a_1})}{T_{p_1} - T_{a_1}} + 1 \right] = 1,439 \text{ sec}$$

$$t_2 = \frac{\dot{m}_a c_{p_a}}{A_p NP \bar{h}_2} \text{Ln} \left[ \frac{T_s - T_{a_2}}{T_s - T_{a_2} - \frac{\dot{m}_p \Lambda}{\dot{m}_a c_{p_a}}} \right] = 3,350 \text{ sec}$$

$$t_1 = \frac{\dot{m}_a c_{p_a}}{(L-1) A_p NP \bar{h}_1} \text{Ln} \left[ \frac{(L-1)(T_{a_4} - T_{a_3})}{T_{p_3} - T_{a_3}} + 1 \right] = 0,301 \text{ sec}$$

$t = \text{tiempo total residencia prill en torre} = t_1 + t_2 + t_3 = 5,090 \text{ sec}$
---

\* Estimación de la altura de la torre mediante el programa TRAJ ( apartado 3.3 )

1.- Datos de operación

$$T_a = \text{Temperatura media aire} = (48,24 + 35) / 2 = 41,62 \text{ C}$$

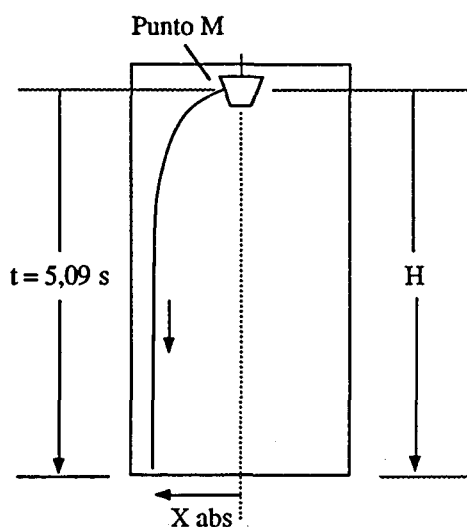
$$\bar{v}_a = \text{Velocidad media ascensión aire} = 0,715 \text{ m/s}$$

$$D_p = \text{Diámetro prill} = 1,5 \text{ mm.}$$

$$v_o = \text{Velocidad inicial prill} = 3,24 \text{ m/s (Punto M del pulverizador rotativo)}$$

$$t = \text{Tiempo residencia prill en torre} = 5,090 \text{ sec.}$$

## 2.- Resultados del programa TRAJ



### Simbología

- $\Delta t$  = Incremento tiempo cálculo  
 $t$  = Tiempo residencia prill en torre  
 $X \text{ abs}$  = Alcance del prill  
 $H$  = Altura torre calculada  
 $H \text{ exp}$  = Altura torre experimental  
 $\epsilon$  = Desviación absoluta de la altura calculada respecto a altura experimental  
 $e$  = Desviación relativa de la altura calculada respecto a altura experimental

Datos Programa		Resultados Programa			
$\Delta t$ (sec)	$t$ (sec)	$X \text{ abs}$ (m)	$H$ (m)	$\epsilon = H - H \text{ exp}$ (m)	$e = \epsilon / H \text{ exp}$
0,01	5,09	2,83	29,91	$29,91 - 33,7 = -3,79$	- 11,2 %

### Conclusiones previas

- 1) Los resultados de cálculo de la torre de prilling de referencia, utilizando el modelo analítico de las tres secciones, conducen a una altura de torre subdimensionada en un - 11,2 %, respecto al valor experimental.

Este resultado es, en principio, lógico, ya que al despreciar una de las dos resistencias térmicas del proceso ( conducción interior del prill ), caben esperar tiempos de solidificación del prill y alturas de torre menores que las reales.

Adicionalmente este resultado está muy próximo al deducido por el modelo de referencia ( desviación de - 12,8 % ), situación que viene a confirmar la buena concordancia del método analítico con el numérico, a pesar de ser ( el primero ) un método de menor complejidad.

- 2) El método analítico de las tres secciones presenta, en principio, mejores resultados de cálculo que el modelo de Steenwinkel-Honti, situación probablemente derivada del menor número de hipótesis de cálculo del primer modelo.

Adicionalmente, se demuestra implícitamente que el modelo físico de las tres secciones se ajusta mejor al proceso de prilling estudiado que el modelo físico de Steenwinkel-Honti, el cual considera la torre como un gran intercambiador de calor, sin distinguir los tres procesos involucrados : enfriamiento de prill líquido, solidificación del prill y enfriamiento del prill sólido.

No obstante, de forma similar al modelo de Steenwinkel, en el presente modelo se requiere los coeficientes medios de transmisión de calor por convección prill-aire para cada sección de la torre, los cuales sólo son determinables a partir del modelo numérico de referencia.

En este sentido, aparece la misma problemática de precisar previamente un modelo numérico para obtener dichos parámetros básicos de cálculo, que serán posteriormente utilizados en el modelo analítico.

## 5.5.- COMPARACION DE RESULTADOS. CONCLUSIONES.

En la Tabla 5.2 se resumen el conjunto de resultados de cálculo de la torre de prilling de urea de referencia, utilizando los tres métodos analíticos de cálculo considerados : modelo de referencia, modelo de las 3 secciones y modelo de Steenwinkel-Honti.

Asimismo, se incluyen, a título de referencia, los resultados experimentales y los resultados de cálculo del modelo numérico 2 ( Programa TP2C ).

En definitiva, dicha tabla resume los resultados de todos los métodos de cálculo de torres de prilling tipo 2 ( pulverizador rotativo ), consideradas en la presente tesis doctoral.

El análisis de dichos resultados permite deducir las conclusiones que a continuación se indican.

- 1) En todos los modelos de cálculo, se determina una temperatura de salida de aire muy similar al valor experimental ( TAS = 48,43 C ), obteniendo desviaciones comprendidas entre 0,4 y 0,8 %.

Adicionalmente existe una concordancia de resultados entre todos los modelos analíticos (TAS = 48,24 C), los cuales desprecian la conducción de calor en el interior del prill ( Perfil de temperatura final del prill a la salida de la torre es uniforme : Temperatura centro prill = Temperatura superficie prill = 75 C ).

En referencia a esta concordancia, debe indicarse que los modelos analíticos de las 3 secciones y de Steenwinkel determinan TAS, a partir de un balance de energía global prill-aire, sin entrar en el proceso de transmisión de calor.

Sin embargo, el modelo ( numérico ) de referencia determina TAS, como resultado de la suma de procesos de transmisión de calor, tramo a tramo (  $\Delta t$  en  $\Delta t$  ), a lo largo de las 3 secciones de la torre.

En este sentido, este resultado confirma implícitamente el buen funcionamiento de las 3 algoritmos numéricos de cálculo de la torre, cuyo nivel de complejidad es mucho mayor que las ecuaciones analíticas de los otros 2 modelos.

En referencia al menor valor de temperatura de salida del aire (TAS = 48,06 ), obtenido mediante el modelo numérico ( Programa TP2C ), debe indicarse que este resultado es asimismo lógico, si se tiene en cuenta que el perfil de temperatura final del prill no es uniforme. Es decir, el prill sólido que abandona al torre presenta, según este modelo, un gradiente de temperatura ( Temperatura centro prill > Temperatura superficie prill ), que refleja el calor sensible acumulado o residual que no ha sido transferido al aire.

- 2) De los 3 métodos analíticos estudiados, el que presenta mejores resultados de cálculo de la altura de la torre es el modelo de las 3 secciones ( desviación del - 11,2 % , respecto al valor experimental ), en concordancia con el carácter menos restrictivo de las hipótesis de cálculo, en comparación con el modelo de Steenwinkel-Honti.

Por otro lado, se observa una buena concordancia de resultados entre el modelo analítico de las 3 secciones y el modelo ( numérico ) de referencia ( desviación del 1,8 % ).

Esta contrastación es asimismo lógica, ya que ambos modelos están basados en el mismo modelo físico de torre, dividida en 3 secciones.

Tomando de referencia estos resultados, puede deducirse que ningún método analítico permite calcular alturas de torre con desviaciones inferiores al 10 % ( límite máximo usual aceptado en ingeniería ), respecto al valor experimental ( $e_{exp}$ ).

En este sentido, se confirma la necesidad de utilizar un modelo numérico que considere la conducción de calor en el interior del prill ( Programa TP2C ), si se pretende dimensionar una torre de prilling con una desviación menor que la indicada.

- 3) En el caso hipotético de pretender utilizar un modelo analítico para el cálculo de torres de prilling, aceptando desviaciones mayores al 10 %, nos hallaríamos ante la necesidad de disponer complementariamente de dos modelos numéricos :
  - a) Modelo numérico para determinar los coeficientes medios de transmisión de calor por convección prill-aire, como variables básicas de cálculo que intervienen en el modelo analítico.
  - b) Modelo numérico para determinar la trayectoria del prill ( altura de la torre ).

Es decir, el mismo modelo analítico resulta implícitamente insuficiente para poder dimensionar correctamente una torre e indirectamente está tendiendo a convertirse en un modelo numérico o seminumérico.



Tabla 5.2 : Comparación de resultados entre los modelos analíticos de cálculo de torres de prilling  
(Torres de prilling tipo 2 : Pulverizador rotativo)

Modelo de cálculo	TAS (C)	t (s)	Altura torre H (m)	$\epsilon_{exp} = H - H_{exp}$ (m)	$e_{exp} = \frac{\epsilon_{exp}}{H_{exp}}$	$\epsilon_N = H - H_N$ (m)	$e_N = \frac{\epsilon_N}{H_N}$
Experimental	48,43	—	33,70	0	0	—	—
Númérico (Programa TP2C)	48,06	5,502	32,56	- 1,14	- 3,4 %	0	0
Referencia (Programa TP2C F = 100.000)	48,24	5,015	29,38 ↕ 1,8 %	- 4,32	- 12,8 %	- 3,18	- 9,8 %
Analítico 3 Secciones	48,24	5,090	TRAJ → 29,91	- 3,79	- 11,2 %	+ 2,65	- 8,1 %
Analítico Steenwinkel-Honti	48,24	6,760	TRAJ → 40,85	+ 7,15	+ 21,2 %	+ 8,29	+ 25,5 %

Especificaciones

- TAS = Temperatura del aire a la salida de la torre  
t = Tiempo de residencia del prill en la torre  
 $\epsilon_{exp}$  = Desviación absoluta de la altura calculada de la torre respecto a la altura experimental.  
 $e_{exp}$  = Desviación relativa de la altura calculada de la torre respecto a la altura experimental.  
 $\epsilon_N$  = Desviación absoluta de la altura calculada de la torre respecto a la altura del método numérico (TP2C).  
 $e_N$  = Desviación relativa de la altura calculada de la torre respecto a la altura del método numérico (TP2C).  
F = Factor multiplicativo de la conductividad térmica del fertilizante ( $\lambda_1, \lambda_s$ )

Datos experimentales de operación de la torre de prilling

- $\dot{m}_f$  = Producción de urea = 13.815 kg/h  
Dp = Diámetro del prill = 1,5 mm.  
 $v_o$  = Velocidad inicial del prill = 3,24 m/s  
To = Temperatura inicial uniforme del prill = 138 C  
TSTOP = Temperatura superficial final del prill = 75 C  
 $\dot{m}_a$  = Caudal másico aire = 348.563 kg/h  
TAE = Temperatura aire a la entrada torre = 35 C

**CAPITULO 6 : CONCLUSIONES GENERALES.  
ACTUACIONES FUTURAS**

Debido a los diferentes tipos de pulverizadores y a la diferencias conceptuales entre la metodología de cálculo y la de simulación de torres de prilling, se han desarrollado tres modelos numéricos :

- 1) Modelo numérico de cálculo de torres de prilling tipo 1 ( pulverizador estático ) : Programa TP1.
- 2) Modelo numérico de cálculo de torres de prilling tipo 2 ( pulverizador rotativo ) : Programa TP2C.
- 2) Modelo numérico de simulación de torres de prilling tipo 2 ( pulverizador rotativo ) : Programa TP2S.

Estos modelos se han elaborado, a partir de una base común definida por :

- 1) Unas hipótesis de cálculo simples, pero suficientemente representativas del proceso de prilling.
- 2) Un modelo físico propuesto de torre de prilling, que considera a ésta dividida en tres secciones : sección de enfriamiento del prill líquido, sección de solidificación del prill y sección de enfriamiento del prill sólido.

Se decidió aceptar esta simplicidad inicial del proceso de prilling por dos motivos :

- 1) En previsión del nivel de complejidad de cálculo posterior, que presenta la elaboración del modelo numérico.  
Este nivel de complejidad hubiera resultado difícilmente abordable, si se hubieran adoptado inicialmente hipótesis menos simples o restrictivas.
- 2) Con la finalidad de disponer de un primer modelo físico y de un primer conjunto de resultados, a partir de los cuales poder decidir si se reconsideraban alguna de las hipótesis adoptadas.  
Esta situación sería aplicable, por ejemplo, a una serie de fenómenos no considerados, inicialmente tales como : la convección de calor en el interior del prill, la posible deformación del prill durante la solidificación ( diferencia de densidad entre la fase líquida y sólida ).

No obstante y a pesar de este planteamiento inicial, los buenos resultados obtenidos, mediante el modelo numérico desarrollado, confirmaron las hipótesis de cálculo y el modelo físico de torre inicialmente adoptados.

En relación a dichos resultados del modelo numérico, deben indicarse los siguientes puntos :

- 1) Para las condiciones de operación de la torre de prilling de urea de referencia, no existe gran diferencia de resultados ( altura de torre ), entre el modelo numérico de cálculo 1 y el modelo 2 ( diferencias del orden del 7 % ).  
Esta situación permite deducir, en principio, que el tipo de pulverizador no condiciona claramente la altura de la torre.
- 2) A la vista de la contrastación experimental realizada, el modelo numérico 2 ( pulverizador rotativo ) ofrece buenos resultados de cálculo ( desviaciones de - 3,5 %, respecto a la altura experimental y de + 0,8 % respecto a la temperatura de aire de salida ), por lo que dicho modelo puede considerarse como inicialmente válido para el cálculo y simulación de torres de prilling.

Esta afirmación queda condicionada a posteriores contrastaciones con otros tipos de fertilizantes ( nitrato amónico ) y con otro tipo de torres ( pulverizador estático ).

- 3) El análisis paramétrico de torres de prilling, utilizando el modelo numérico 2 (capítulo 5), ha permitido deducir una serie de conclusiones importantes, relativas al diseño y simulación de torre de prilling.

En primer lugar, se ha deducido que los parámetros con mayor influencia o importancia en el proceso de cálculo de una torre de prilling ( determinación de la altura ) son :

- \* Variables termofísicas :      Coeficiente de transmisión de calor prill - aire (  $h$  )  
  Calor latente de solidificación del prill (  $\Lambda$  )
- \* Condiciones de operación : Diámetro del prill (  $D_p$  )  
  Temperatura superficial final del prill (  $T_{STOP}$  )  
  Temperatura del aire a la entrada de la torre ( TAE )

Durante este estudio, se ha confirmado, de forma implícita, la validez de la hipótesis de desprestigiar la convección de calor en el interior del prill ( fase líquida del fertilizante ), realizada cuando se definió el modelo físico de torre de prilling.

En relación al análisis paramétrico de simulación de torre de prilling, se ha determinado que las variables con mayor influencia sobre el punto de funcionamiento de una torre son:

- \* Condiciones de operación : Diámetro del prill (  $D_p$  )  
  Temperatura del aire a la entrada de la torre ( TAE )

En los dos tipos de análisis paramétrico estudiados ( cálculo y simulación ) se ha podido cuantificar, de forma relativa, la precisión mínima exigible ( variables termofísicas ) o el margen máximo de variación ( condiciones de operación ) de los parámetros a estudio, sin afectar sensiblemente (  $\pm 5\%$  ) el dimensionado de la torre ( altura ) o el punto de funcionamiento de la misma.

En ambos casos, la variable con mayor influencia es el diámetro del prill, por lo que puede afirmarse que el correcto dimensionado de una torre o la fiabilidad de su punto de funcionamiento depende, en gran parte, del buen funcionamiento del pulverizador, como generador de prills de un diámetro medio determinado.

Debido a la similitud de procesos de transmisión de calor y de resultados obtenidos, este conjunto de conclusiones se consideran, en principio, extensibles a torres de prilling tipo 1 ( pulverizador estático ).

- 4) En referencia a los modelos de cálculo de torres de prilling existentes en la bibliografía, el único modelo del que se tiene referencia ( modelo analítico de Steenwinkel-Honti ) ofrece resultados de cálculo con desviaciones notables respecto a los valores experimentales ( desviación del + 21 %, respecto a la altura real de la torre ). Esta situación viene a confirmar que las hipótesis de cálculo, en la que se basa dicho modelo, son discutibles.

El modelo analítico propuesto ( modelo de las tres secciones ) se ajusta mejor a los datos experimentales ( desviación de - 13 %, respecto a la altura experimental de la torre ), ya que dicho modelo ha sido elaborado, a partir de hipótesis de cálculo menos restrictivas.

Sin embargo y como conclusión a los modelos analíticos analizados, puede afirmarse que todos ellos ofrecen resultados con desviaciones superiores al 10 %, requiriendo adicionalmente la disponibilidad previa de variables básicas de cálculo ( coeficiente medio de transmisión de calor prill-aire ), sólo deducibles, a partir de un modelo numérico.

Por dichos motivos puede afirmarse que el proceso de prilling no es resoluble, de forma mínimamente aceptable, mediante un modelo analítico, sino que requiere un modelo numérico como el desarrollado.

En referencia a la parte informática de la presente tesis doctoral, debe mencionarse que los programas de cálculo por ordenador desarrollados han sido confeccionados, utilizando el lenguaje Fortran 77, operando con el ordenador de la ETS Enginyers Industrials de Terrassa, cuyas características básicas son :

- \* Ordenador : VAX 6000 - 410
- \* Memoria RAM : 32 Mbytes
- \* Disco duro : 1,5 Gbytes
- \* Velocidad CPU : 7 VUP ( Vax Unit Processing )  
( 1 VUP corresponde aproximadamente a 1 MIPS = Million Instructions Per Second )

A título indicativo, el tiempo de ejecución ( CPU time ) empleado por el programa TP2C (modelo numérico 2 de cálculo de torre de prilling) ha oscilado entre 4,01 y 4,20 segundos.

En este tiempo, el ordenador resuelve, adicionalmente al resto de operaciones de cálculo del programa, una media de 350 sistemas de 50 ecuaciones con 50 incógnitas, correspondientes a los aproximadamente 350 pasos o tramos de cálculo (  $\Delta t$  en  $\Delta t$  ), asociados a la resolución de los tres algoritmos numéricos de transmisión de calor de las tres secciones de la torre de prilling.

Como punto final a este conjunto de conclusiones, quisiera especificar una doble lectura de los objetivos conseguidos, mediante el presente trabajo de investigación :

- 1) Se ha desarrollado un nuevo modelo de cálculo y simulación de torres de prilling, cuya contrastación experimental limitada ofrece, en principio, buenos resultados de cálculo.
- 2) Se ha pretendido adicionalmente realizar una contribución a la resolución de los procesos de intercambio de calor con cambio de fase, cuya aplicación puede ser extensible a otro tipo de procesos, tales como :
  - Proceso de evaporación de las gotas de combustible en quemadores y en motores de combustión interna.
  - Proceso de transmisión de calor y masa entre el agua y el aire en intercambiadores de calor de contacto directo, tales como torres de refrigeración o condensadores evaporativos.
  - Procesos de cambio de fase, asociados a los acumuladores de hielo, utilizados en técnicas de ahorro energético en el campo de la refrigeración y el acondicionamiento de aire.

**CAPITULO 7 : DATOS Y PROPIEDADES TERMOFISICAS**

**UREA**

[ Ref. : 2, 6, 41 - 43 ]

Fórmula química	: $\text{NH}_2 - \text{CO} - \text{NH}_2$ ( carbamida )
Peso molecular	: 60,06
Estado físico	: sólido blanco, inodoro, algo higroscópico y con sabor salino
Forma cristalina	: tetragonal ( agujas o prismas rómbicos )
Punto de fusión	: 132,7 C ( 1 atm ) 150,0 C ( 3000 atm )
Densidad	: 1335 kg / m <sup>3</sup> ( sólido, 0 C ) 1330 kg / m <sup>3</sup> ( sólido, 25 C ) 1225 kg / m <sup>3</sup> ( líquido, 132,7 C )
Entalpía de formación	: - 47,120 cal / mol = - 197,15 J / mol ( 25 C )
Calor latente de fusión	: 57,8 cal / gr = 241,8 J / gr
Calor de disolución en agua	: 58 - 60 cal / gr = 243 - 251 J / gr ( endotérmico )
Calor específico ( sólido )	: 0,32 kcal / kg C = 1,34 kJ / kg C
Calor específico ( líquido )	: 0,76 kcal / kg C = 3,18 kJ / kg C
Conductividad térmica ( sólido )	: 0,43 kcal / h m C = 0,50 W / m C
Conductividad térmica ( líquido )	: 0,33 kcal / h m C = 0,38 W / m C ( 132,7 C )

**Propiedades de las soluciones acuosas de urea**

Temperatura ( C )	Solubilidad ( gr. urea / 100 gr. solución )	Densidad ( gr / cm <sup>3</sup> )	Viscosidad ( cp )	Presión vapor agua ( mm Hg )
0	41,0	1,120	2,63	4
20	51,6	1,147	1,96	13
40	62,2	1,167	1,72	40
60	72,2	1,184	1,72	90
80	80,6	1,198	1,93	160
100	88,3	1,210	2,35	220
120	95,5	1,221	2,93	135
130	99,2	1,226	3,25	7

**AIRE**

[ Ref. : 44 ]

Temperatura	Viscosidad ( kg / m s )	Conductividad térmica ( W / m C )	Calor específico ( kJ / kg C )
250 K = - 23,15 C	1,604 E -05	0,02232	1,005
300 K = 22,85 C	1,850 E -05	0,02615	1,006
350 K = 76,85 C	2,077 E -05	0,02969	1,009
400 K = 126,85 C	2,290 E -05	0,03307	1,014

Ecuaciones de ajuste de propiedades :

1) Viscosidad :  $\mu$  ( 10 -6 ) =  $T^{1/2} / ( 0,671692 + 85,22974 / T - 2111,475 / T^2 + 106,417 / T^3 )$

 $\mu$  : viscosidad ( kg / m s )

T : temperatura ( K )

Margen de validez : 90 - 1000 K

Desviación media : 0,2 %

2) Conductividad térmica :  $k = T^{1/2} / ( 328,052 + 167,320 / T - 3,02953 \text{ E}+07 / T^2 + 3,05862 \text{ E}+09 / T^3 )$

k : conductividad térmica ( W / m C )

T : temperatura ( K )

Margen de validez : 300 - 600 K

Desviación media : 0,04 %

3) Calor específico :  $c_p = 0,24 \text{ kcal / kg C} = 1,0 \text{ kJ / kg C}$

Se acepta este valor constante para el margen de temperaturas de trabajo : 0 - 100 C



**CAPITULO 8 : BIBLIOGRAFIA**

**Nota previa :**

El signo \* indica la primera aparición de una referencia bibliográfica, la cual es citada posteriormente.

- \* [ 1 ] Kirk - Othmer ( 1980 ). Encyclopedia of Chemical Technology. Vol. 9, pp. 25- 150. John Wiley. NewYork.
- [ 2 ] Kirk - Othmer ( 1980 ). Opus cited. Vol. 21, pp. 37 - 55.
- [ 3 ] Kirk - Othmer ( 1980 ). Opus cited. Vol. 23, pp. 548 - 575.
- [ 4 ] Kirk - Othmer ( 1980 ). Opus cited. Vol. 2, pp. 313 - 331.
- \* [ 5 ] Honti, G.D. ( 1976 ). The Nitrogen Industry. Part 1, pp. 449 - 508. Akadémiai Kiadó. Budapest.
- [ 6 ] Honti, G.D. ( 1976 ). Opus Cited. Part 1, pp. 509-546.
- [ 7 ] Honti, G.D. ( 1976 ). Opus Cited. Part 1, pp. 553-593.
- [ 8 ] Stamicarbon BV. (1974 ). Urea Plant. Publicación técnica de Stamicarbon BV . Enngineering Division.
- [ 9 ] Otsuka F. , Inoue S. and Jojima T. ( 1976 ). What's new in urea technology. Hydrocarbon Processing. November 1976, pp. 160-164.
- [ 10 ] Kaasenbroud, P.J.C. and Logemann, J.D. ( 1969 ). DSM's new urea stripping process. Hydrocarbon Processing. April 1969, pp. 117 - 121.
- [ 11 ] Cook, Lucien H. ( 1966 ). Use these design criteria for large recycle urea plants. Hydrocarbon Processing. February 1966, vol. 45, pp. 129-136.
- [ 12 ] Honti, G.D. ( 1976 ). Opus Cited. Part 1, pp. 595-608.
- [ 13 ] Ruskan, R.P. ( 1976 ). Prilling vs. granulation for nitrogen fertilizar production. Chemical Engineering. June 1976, pp. 114-118.
- [ 14 ] Steenwinkel, F.E. and Hoogendonk, J.W. ( 1969 ). The prilling of compound fertilizers. The Fertilizer Society. London.
- [ 15 ] Carter, R.W.R. and Roberts, A.G. ( 1969 ). The production of ammonium nitrate including handling and safety. The Fertilizer Society. London.
- [ 16 ] Van der Berg, P.J. and Hallie, G. ( 1960 ). New developments in granulation techniques. The Fertilizer Society. London.
- [ 17 ] Tennessee Valley Authority ( 1982 ). Curtain-granulation process. Technical update. TVA. National Fertilizer Development Center. Muscle Shoals. Alabama. USA.
- [ 18 ] Skauli, O. and Lie, O.H. ( 1979 ). The pan granulation process. The Fertilizer Society. London.
- \* [ 19 ] Perry, R.H. and Chilton, C.H. ( 1973 ). Chemical Engineer 's Handbook. pp. 8-64. Mc-Graw-Hill, 5 th Edition. New York.
- [ 20 ] Codina, E y Pardo, F. ( 1985, 1986 y 1987 ). Comunicación personal. Información técnica de planta de urea. Ercros. Barcelona / Málaga.

- [ 21 ] Dueñas, P. y Alvarez, E. ( 1990 ). Comunicación personal. Información técnica de planta de nitrato de amónico. Enfersa. Puertollano.
- [ 22 ] Roeleyeld, C. ( 1982 ). Reduction of urea losses in the plant effluent in existing plants and for new projects. Stamicarbon ' s 6 th Urea Symposium. Paper 5.
- [ 23 ] Nommensen, J. ( 1982 ). Gas-Cleaning equipment for limiting the dust emissin from urea prilling towers. Stamicarbon' s 6th. Urea Sypmposium. Paper 10.
- [ 24 ] Perry, R.H. and Chilton, C.H. ( 1973 ). Opus cited. pp. 5.61-5.64.
- [ 25 ] Bird, R.B, Stewart, W.E. and Lightfoot, E.N. ( 1973 ). Fenómenos de transporte. pp. 6-11 a 6-17. Editorial Reverté. SA. Barcelona.
- [ 26 ] ASHRAE ( 1989 ). Fundamentals Handbook. pp 3-12 a 3-15. American Society of Heating, Refrigeratrig and Air-Conditioning Engineers. Atlanta . USA.
- [ 27 ] Wong, H.Y. ( 1977 ). Heat transfer for Engineers. pp. 44-48. Longman. London.
- [ 28 ] Mc Adams, W.H. ( 1954 ). Heat Transmission. pp. 265-266. Mc. Graw-Hill. New York.
- [ 29 ] Honti, G.D. ( 1976 ). Opus Cited. pp. 600.
- [ 30 ] Bird, RB. et al. ( 1973 ). Opus cited. pp. 13-22.
- [ 31 ] Eckert, E.R.G. and Drake, R.M. ( 1972 ). Analysis of Heat and Mass Transfer. pp. 222-228. Mc Graw-Hill. New York.
- [ 32 ] Gröber, H., Erk S. and Gricull. U. ( 1967 ). Transmisión de calor. pp. 65-71. Selección Científicas. Madrid.
- [ 33 ] Patankar, S.V. ( 1980 ). Numerical heat transfer and fluid flow. pp. 25-58. Mc Graw-Hill. New York.
- [ 34 ] Sparrow, E.M. and Chuk, W. ( 1984 ). An implicit / explicit numerical solution scheme for phase - change problems. Numerical Heat Transfer, vol. 7, pp. 1-15.
- [ 35 ] Hsiao, J.S. ( 1985 ). An efficient algorithm for finite - difference analyses of heat transfer with melting and solidification. Numerical Heat Transfer ( ASME ), vol. 107, pp. 653 - 666.
- [ 36 ] Frederick, D and Greif, R. ( 1985 ). A method for the solution of heat transfer problems with a change of phase. Journal of Heat Transfer ( ASME ), vol. 111, pp. 550 - 526.
- [ 37 ] Poirier, D. and Salcudean, M. ( 1988 ). On numerical methods used in mathematical modeling of phase change in liquis metals. Journal of Heat Transfer ( ASME ), vol. 110, pp. 562-570.
- [ 38 ] Prud ' Homme, M., Hung Nguyen, T., and Long Nguyen, D. A heat transfer analysis for solidification of slabs, cylinders and spheres. Journal of Heat Transfer ( ASME ), vol. 111, pp. 699-705.
- [ 39 ] Scheid, F. ( 1972 ). Análisis numérico. pp. 223-225. Mc Graw-Hill. Colombia.
- [ 40 ] Pachierd, M.W. ( 1974 ). Desorption and Prilling Sections of Urea Plants. Stamicarbon ' s 4th. Urea Synposium. Geleen. Holland.

- [ 41 ] Perry, R.H. and Chilton, C.H. ( 1973 ). Opus cited, pp. 3.236 y 3.242.
- [ 42 ] Reid, R.C., Prausnitz, J.M. and Sherwood, T.K. ( 1977 ). The properties of gases and liquids, pp. 517. Mc Graw-Hill. New York.
- [ 43 ] International Fertilizer Development Center ( 1985 ). Documentación técnica sobre fertilizantes, Muscle Shoals. Alabama. USA.
- [ 44 ] ASHRAE ( 1976 ). Thermophysical properties of refrigerants, pp. 171 - 176. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. New York.

**CAPITULO 9 : NOMENCLATURA**

**Nota previa :**

Algunos símbolos incluyen el apartado del texto donde se definen o se utilizan por primera vez .

**Símbolos**

- $a(i)$ ,  $b(i)$ ,  $c(i)$ ,  $d(i)$  : Coeficientes de la ecuación implícita de  $T(i)$ , resultante de aplicar el balance de energía sobre el elemento o volumen de control  $i$ .
- $A$  : Proyección del área de una esfera, cayendo en un fluido, en la dirección del movimiento ( $= \pi R^2$ ) ( apartado 2.2 y apartado 3.3.2 ).
- $A_p$  : Area exterior del prill ( $= 4 \pi R^2$ ).
- $C$  : Factor de fricción o coeficiente de resistencia entre una esfera y un fluido ( apartado 2.2 y apartado 3.3.2 ).
- $C_D$  : Coeficiente de descarga del orificio del pulverizador rotativo ( apartado 3.2 ).
- $cp_a$  : Calor específico medio del aire.
- $cp_L$  : Calor específico del fertilizante líquido ( urea ).
- $cp_S$  : Calor específico del fertilizante sólido ( urea ).
- $D$  : Diámetro de la torre.
- $D_p$  : Diámetro del prill ( esfera ) ( apartado 2.3, apartado 3.3.2 ).
- $D_s$  : Diámetro del prill.
- $E$  : Calor entrante ( kcal, w ) por conducción en el elemento  $k$  ( en cambio de fase ), proveniente del elemento  $k-1$  ( fase líquida ), durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$  ( apartado 2.5.3 ).
- $E$  : Empuje de Arquímedes que actúa sobre una esfera ( prill ), desplazándose a una velocidad determinada, respecto a un fluido ( aire ) ( apartado 2.2, apartado 3.3.2 ).
- $E_f$  : Pérdidas por fricción del prill líquido en su paso a través del orificio del pulverizador rotativo ( apartado 3.2 ).
- $f_t(r)$  : Valor de la función  $f$  en un punto interior del prill, a distancia  $r$  del centro, en el instante  $t$  ( En nuestro caso  $f = T$  ) ( apartado 2.4.3 ).
- $f_{t+\Delta t}(r)$  : Valor de la función  $f$  en un punto interior del prill, a distancia  $r$  del centro, en el instante  $t + \Delta t$  ( En nuestro caso  $f = T$  ) ( apartado 2.4.3 ).
- $f'_t(r)$  : Derivada primera de  $f_t(r)$  ( apartado 2.4.3 ).
- $f''_t(r)$  : Derivada segunda de  $f_t(r)$  ( apartado 2.4.3 ).

- $F$  : Factor multiplicativo de la conductividad térmica del fertilizante líquido ( $\lambda_L$ ) o del fertilizante sólido ( $\lambda_S$ ) ( apartado 5.2 ).
- $F$  : Fuerza de rozamiento actuando sobre una esfera ( prill ), desplazándose a una velocidad determinada, respecto al fluido ( aire ) ( apartado 2.2, apartado 3.3.2 ).
- $F_x$  : Componente horizontal de la fuerza de rozamiento  $F$  ( apartado 3.3.2 ).
- $F_y$  : Componente vertical de la fuerza de rozamiento  $F$  ( apartado 3.3.2 ).
- $G$  : S - E
- $Go$  : Calor generado ( kcal, W ) en la solidificación del elemento o volumen de control  $k$  ( apartado 2.5.3 ).
- $h$  : Coeficiente de transmisión de calor por convección entre el prill y aire.
- $h_1$  : Coeficiente de transmisión de calor por convección prill-aire en un instante dado ( Sección 1 de la torre ) ( apartados 5.4 ).
- $h_2$  : Coeficiente de transmisión de calor por convección prill-aire en un instante dado ( Sección 2 de la torre ) ( apartados 5.4 ).
- $h_3$  : Coeficiente de transmisión de calor por convección prill-aire en un instante dado ( Sección 3 de la torre ) ( apartados 5.4 ).
- $\bar{h}$  : Coeficiente medio de transmisión de calor por convección prill-aire, respecto al tiempo total de residencia del prill en la torre ( apartados 5.2 y 5.3 ).
- $\bar{h}_1$  : Coeficiente medio de transmisión de calor por convección prill-aire, respecto al tiempo total de residencia del prill en la sección 1 de la torre ( apartados 5.2 y 5.4 ).
- $\bar{h}_2$  : Coeficiente medio de transmisión de calor por convección prill-aire, respecto al tiempo total de residencia del prill en la sección 2 de la torre ( apartados 5.2 y 5.4 ).
- $\bar{h}_3$  : Coeficiente medio de transmisión de calor por convección prill-aire, respecto al tiempo total de residencia del prill en la sección 3 de la torre ( apartados 5.2 y 5.4 ).
- $H_1$  : Altura de la sección 1 ( sección enfriamiento prill líquido ) ( apartado 2.5.5 ).
- $H_2$  : Altura de la sección 2 ( sección solidificación prill ) ( apartado 2.5.5 ).
- $H_3$  : Altura de la sección 3 ( sección enfriamiento prill sólido ) ( apartado 2.5.5 ).
- $H$  : Altura total de la torre ( =  $H_1 + H_2 + H_3$  ).
- $k$  : Elemento o volumen de control en cambio de fase ( solidificación ) ( apartado 2.5.3 ).
- $k_1, k_2, k_3, k_4$  : Constantes del método de integración de Runge-Kutta ( apartado 3.3.3 ).
- $l_1, l_2, l_3, l_4$  : Constantes del método de integración de Runge-Kutta ( apartado 3.3.3 ).
- $L$  : Variable de cálculo ( =  $\dot{m}_a c_{p_a} / \dot{m}_p c_{p_L}$  ) ( apartado 5.4 ).

- $m$  : Masa del prill de fertilizante ( apartado 3.2 ).  
 $\dot{m}_a$  : Caudal másico de aire en la torre.  
 $\dot{m}_f$  : Caudal másico de fertilizante.  
 $\dot{m}_p$  : Caudal másico de fertilizante ( apartado 5.2 ).  
 $N$  : Número de elementos o volúmenes de control ( envolventes esféricas ) resultante de la discretización del prill esférico.  
 $NP$  : Número de prills por unidad de tiempo descendiendo a través de la torre.  
 $P$  : Peso del prill ( esfera ) ( apartado 2.2, apartado 3.3.2 ).  
 $P(i), Q(i)$  : Coeficientes finales de la ecuación implícita de  $T(i)$  ( apartado 2.5.2 ).  
 $P'(i), Q'(i)$  : Coeficientes finales de la ecuación implícita de  $T(i)$  para el elemento o volumen de control  $N$  ( apartado 2.5.2 ).  
 $r$  : Distancia desde un punto interior del prill al centro del mismo ( radio de un punto interior del prill ).  
 $r$  : Radio del pulverizador rotativo ( apartado 3.2 ).  
 $R$  : Radio del prill.  
 $R_1$  : Radio interior del prill que situa la interfase líquido - sólido ( apartado 2.4.1 ).  
 $R_a$  : Caudal específico de aire a la entrada de la torre (  $m^3 / kg.fertilizante$  ) ( apartado 3.3 ).  
 $r_e, r_e(i)$  : Radio exterior del elemento  $i$ .  
 $r_i, r_i(i)$  : Radio interior del elemento  $i$ .  
 $RP$  : Radio del pulverizador rotativo ( punto M ) ( apartado 3.4.1.2 ).  
 $S$  : Calor saliente ( kcal, w ) por conducción del elemento  $k$  ( en cambio de fase ) hacia el elemento  $k+1$  ( fase sólida ), durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$  ( apartado 2.5.3 ).  
 $S$  : Variable de cálculo (  $= \dot{m}_a c_{p_a} / \dot{m}_p c_{p_s}$  ) ( apartado 5.4 ).  
 $t$  : Tiempo ( general ).  
 $t, t_{TOT}$  : Tiempo de residencia total del prill en la torre.  
 $t_1, t_2, t_3$  : Tiempo de residencia del prill en la sección 1, sección 2 y sección 3 de la torre respectivamente.  
 $t_A$  : Tiempo de consecución de la etapa A ( enfriamiento del elemento  $k$  hasta  $T_s$  ) (  $T_s = 132,7 C / urea$  ).  
 $t_B$  : Tiempo de consecución de la etapa B ( solidificación del elemento  $k$  a  $T_s = cte$  ) (  $T_s = 132,7 C / urea$  ).



- $t_L$  : Tiempo de residencia del prill en la sección 1 en un instante dado ( apartado 2.5.5.2 ).  
 $t_S$  : Tiempo de residencia del prill en la sección 3 en un instante dado ( apartado 2.5.5.2 ).  
 $T$  : Temperatura ( general ).  
 $T$  : Temperatura del prill ( fase sólida ) ( apartado 2.4.1 ).  
 $T_a$  : Temperatura del aire ( general ) ( apartado 5.2 ).  
 $\bar{T}_a$  : Temperatura media del aire en la torre.  
 $T_{ao}$  : Temperatura del aire a la entrada de la torre ( parte superior ) ( apartado 5.2 ).  
 $T_{af}$  : Temperatura del aire a la salida de la torre ( parte inferior ) ( apartado 5.2 ).  
 $T_A$  : Temperatura del aire ( general ).  
 $T_{AE}$  : Temperatura del aire a la entrada de la torre ( base torre ).  
 $T_{AS}$  : Temperatura del aire a la salida de la torre ( aspiración ventilador ).  
 $T_{AS}^*$  : Temperatura del aire a la salida de la torre ( descarga ventilador ) ( apartado 1.4 ).  
 $T_{A2}$  : Temperatura del aire a la salida de la sección 2.  
 $T_{A3}$  : Temperatura del aire a la salida de la sección 3.  
 $T_{AI}$  : Temperatura del aire en el instante  $t$ .  
 $T_{AF}$  : Temperatura del aire en el instante  $t + \Delta t$ .  
 $T_{AM}$  : Temperatura media del aire entre  $t$  y  $t + \Delta t$ .  
 $T_f$  : Temperatura de film ( prill - aire ).  
 $T_{fin}$  : Temperatura superficial final del prill ( salida torre ).  
 $T_g$  : Temperatura fluido ( aire ) en contacto con una esfera ( prill líquido ) ( ap. 2.6.2.1 ).  
 $T_I$  : Temperatura de la interfase líquido-sólido en el interior del prill ( apartado 2.5.3 ).  
 $T^o(i)$  : Temperatura del elemento o volumen de control  $i$  en el instante  $t$ .  
 $T(i)$  : Temperatura del elemento o volumen de control  $i$  en el instante  $t + \Delta t$ .  
 $T^n(i)$  : Temperatura del elemento o volumen de control  $i$  en el instante  $t$  (  $= n \Delta t$  ).  
( apartado 2.4.3 ).  
 $T^{n+1}(i)$  : Temperatura del elemento o volumen de control  $i$  en el instante  $t + \Delta t$   
(  $= [n + 1] \Delta t$  ) ( apartado 2.4.3 ).  
 $T_o$  : Temperatura inicial uniforme del prill.

- $T_p$  : Temperatura del prill ( general ) ( apartado 5.2 y 5.4 ).  
 $T_{po}$  : Temperatura del prill líquido a la entrada de la torre ( parte superior ) ( ap. 5.2 ).  
 $T_{pf}$  : Temperatura del prill sólido a la salida de la torre ( parte inferior ) ( ap. 5.2 ).  
 $T_s$  : Temperatura de solidificación del fertilizante (  $T_s = 132,7 \text{ C / urea}$  ).  
 $T_{STOP}$  : Temperatura superficial final del prill ( base de la torre ).  
 $v$  : Velocidad ( general ).  
 $v_{\infty}$  : Velocidad límite de caída del prill ( apartado 2.2 ).  
 $v_a$  : Velocidad de ascensión del aire en la torre en un punto determinado.  
 $\bar{v}_a$  : Velocidad media de ascensión del aire en la torre.  
 $v(k)$  : Función de cálculo ( apartado 2.6.2.1 ).  
 $v_o$  : Velocidad inicial de salida del prill del pulverizador.  
 $v_p$  : Velocidad absoluta de caída del prill en la torre en un instante dado.  
 $v_{pa}$  : Velocidad relativa de caída del prill respecto al aire (  $= \vec{v}_p - \vec{v}_a$  ) ( apartado 3.3.2 ).  
 $v_{pmax}$  : Velocidad absoluta máxima de caída del prill (  $= \vec{v}_{\infty} - \vec{v}_a$  ).  
 $v_x$  : Componente horizontal de la velocidad del prill  $v_p$  ( apartado 3.3.2 ).  
 $v_y$  : Componente vertical de la velocidad del prill  $v_p$  ( apartado 3.3.2 ).  
 $\bar{v}_x$  : Valor medio de la componente horizontal de la velocidad del prill  $v_p$ , durante un intervalo de tiempo  $\Delta t$  ( apartado 3.3.3 ).  
 $\bar{v}_y$  : Valor medio de la componente vertical de la velocidad del prill  $v_p$ , durante un intervalo de tiempo  $\Delta t$  ( apartado 3.3.3 ).  
 $v_z$  : Componente radial de la velocidad inicial de salida del prill del pulverizador (  $v_o$  ) ( apartado 3.2 ).  
 $v_{\omega}$  : Componente tangencial de la velocidad inicial de salida del prill del pulverizador (  $v_o$  ) ( apartado 3.2 ).  
 $\dot{V}_a$  : Caudal volumétrico de aire a la entrada de la torre.  
 $V_p$  : Volumen del prill ( apartado 5.2 ).  
 $V_s$  : Volumen del prill ( apartado 2.2 y apartado 3.3.2 ).

- X : Variable de cálculo ( $= m_a c_{p_a} / 3600 h NP Ap \Delta t$ ) (apartado 2.5.2).
- X : Alcance del prill = Distancia horizontal entre el punto de salida del prill del pulverizador rotativo y la posición del prill en la torre, en un instante dado (apartado 3.3.2).
- Xabs : Alcance absoluto del prill = Distancia horizontal entre el centro de la torre (= centro del pulverizador rotativo) y la posición del prill en la torre, en un instante dado. (Aproximación aceptada:  $Xabs = X + \text{radio pulverizador} \approx X$ ) (apartado 3.3.2).
- Y : Caída del prill en la torre = Distancia vertical entre el punto de salida del prill del pulverizador y la posición del prill en la torre, en un instante dado (apartado 3.3.2).

### Símbolos griegos

- $\alpha$  : Difusividad térmica ( $= \lambda / \rho c_p$ ).
- $\alpha$  : Angulo que forma la velocidad absoluta de caída del prill ( $v_p$ ) con la vertical (ap. 3.3.2).
- $\alpha_L$  : Difusividad térmica del fertilizante (fase líquida) ( $= [\lambda / \rho c_p]_L$ ) (ap. 2.4.1).
- $\alpha_S$  : Difusividad térmica del fertilizante (fase sólida) ( $= [\lambda / \rho c_p]_S$ ) (ap. 2.4.1).
- $\beta$  : Angulo que forma la velocidad relativa de caída del prill respecto al aire ( $v_{pa}$ ) con la vertical (ap. 3.3.2).
- $\delta$  : Diferencia entre la temperatura en un punto interior de una esfera (prill líquido) y un fluido (esfera), en contacto con ella ( $= T - T_g$ ) (apartado 2.6.2.1).
- $\Delta H$  : Variación de entalpía específica del prill, asociado a su proceso de solidificación en la torre (apartado 5.2).
- $\Delta r$  : Incremento de radio de cálculo, resultado de la discretización del prill.
- $\Delta t$  : Incremento de tiempo de cálculo (general).
- $\Delta t_A$  : Incremento de tiempo de cálculo de la etapa A (sección 2) (apartado 2.5.5.2).
- $\Delta t_B$  : Incremento de tiempo de cálculo de la etapa B (sección 2) (apartado 2.5.5.2).
- $\Delta t_L$  : Incremento de tiempo de cálculo de la sección 1.
- $\Delta t_S$  : Incremento de tiempo de cálculo de la sección 3.
- $\Delta T_o$  : Diferencia de temperatura prill-aire en la parte superior de la torre ( $= T_{po} - T_{ao}$ ) (apartado 5.2).
- $\Delta T_f$  : Diferencia de temperatura prill-aire en la parte inferior de la torre ( $= T_{pf} - T_{af}$ ) (apartado 5.2).
- $\Delta T_{lm}$  : Diferencia de temperatura logarítmica media entre el prill y el aire (entrada / salida torre) [ $= \Delta T_o - \Delta T_f / \ln (\Delta T_o / \Delta T_f)$ ] (apartado 5.2).
- $\overline{\Delta v_x}$  : Valor promedio del incremento de la componente horizontal ( $v_x$ ) de la velocidad del prill, durante un incremento de tiempo  $\Delta t$  (Método Runge-Kutta, ap. 3.3.3).
- $\overline{\Delta v_y}$  : Valor promedio del incremento de la componente vertical ( $v_y$ ) de la velocidad del prill, durante un incremento de tiempo  $\Delta t$  (Método Runge-Kutta, apartado 3.3.3).

- $\lambda_L$  : Conductividad térmica del fertilizante líquido.  
 $\lambda_S$  : Conductividad térmica del fertilizante sólido.  
 $\lambda^*$  : Media armónica entre  $\lambda_L$  y  $\lambda_S$  ( Conductividad térmica de la interfase / apartado 2.5.3 ).  
 $\Lambda$  : Calor latente de solidificación del fertilizante ( urea ).  
 $\mu$  : Viscosidad del aire ( apartado 2.2, apartado 3.3.2 ).  
 $\rho$  : Densidad del fertilizante ( urea ).  
 $\rho_a$  : Densidad del aire.  
 $\rho_s$  : Densidad del prill ( apartado 2.2, apartado 3.3.2 ).  
 $\theta$  : Temperatura del prill ( fase líquida ) ( apartado 2.4.1 ).  
 $\theta_o$  : Temperatura inicial uniforme del prill ( fase líquida ) ( apartado 2.4.1 ).  
 $\theta_s$  : Temperatura de solidificación del prill ( apartado 2.4.1 ).  
 $\Sigma F_x$  : Resultante de las fuerzas horizontales que actúan sobre el prill, en su trayectoria de descenso por la torre ( apartado 3.3.2 ).  
 $\Sigma F_y$  : Resultante de las fuerzas verticales que actúan sobre el prill, en su trayectoria de descenso por la torre ( apartado 3.3.2 ).  
 $\Sigma t_A$  : Tiempo total acumulado de la etapa A ( sección 2 ), desde el elemento N-1 al elemento k ( apartado 2.5.3 ).  
 $\Sigma t_B$  : Tiempo total acumulado de la etapa B ( sección 2 ), desde el elemento N al elemento k ( apartado 2.5.3 ).  
 $\omega$  : Velocidad angular de rotación del pulverizador rotativo ( apartado 3.2 ).  
 $\omega_s$  : Velocidad angular de rotación del fertilizante fundido en el interior del pulverizador rotativo ( apartado 3.2 ).

