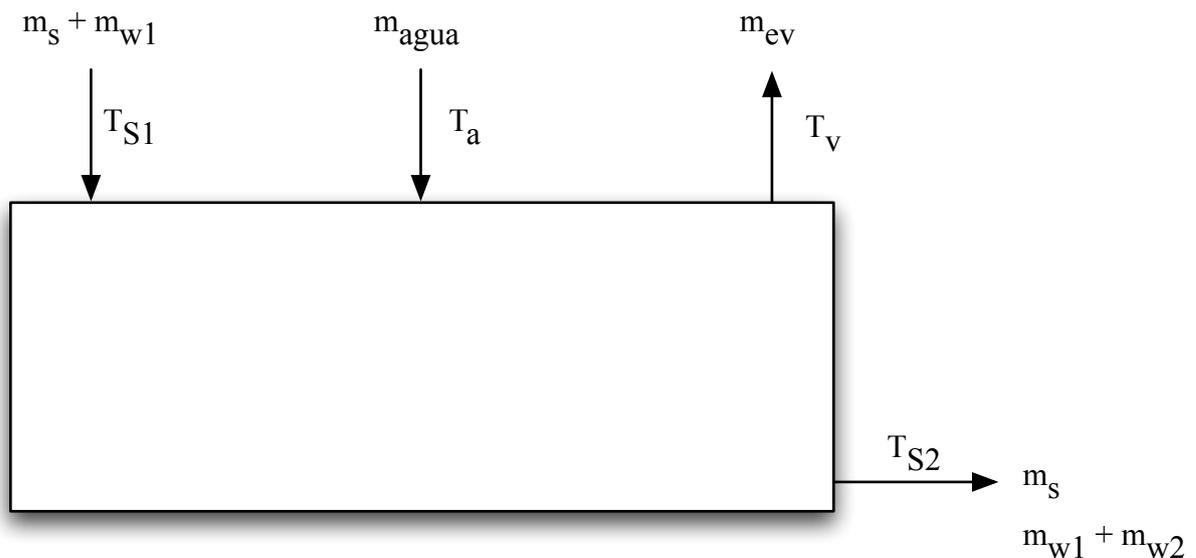


ANEXO 4. DISEÑO DEL TRANSPORTADOR - ENFRIADOR

El material descontaminado de salida del desorbedor junto con las partículas recogidas en el separador ciclónico y filtro de mangas llegan a un transportador de tornillo encargado de mezclar las 3 corrientes al mismo tiempo que se suministra a la carga de sólidos una dispersión de agua para conseguir disminuir la alta temperatura con la cual el material descontaminado sale del horno rotativo, y de esta forma mejorar su manejabilidad y evitar la dispersión de polvo.

Se representa a continuación un esquema del transportador de tornillo en cuestión, provisto de una boca de carga por donde entra el material descontaminado de salida del desorbedor, una entrada de tubería que conduce el agua de refrigeración (la cual se deriva a lo largo de todas las boquillas a presión dispuestas a lo largo del transportador), una boca de descarga por donde sale el caudal másico de sólidos a una temperatura inferior de la de entrada y con un contenido superior en humedad y una salida de tubería por donde circula el vapor de agua generado en el proceso de enfriamiento del material:



En el diseño del transportador de tornillo hay que determinar los siguientes parámetros :

- Diámetro del transportador.
- Longitud del transportador
- Velocidad de giro.
- Potencia consumida por el mismo.
- Caudal másico de agua a presión necesario para cumplir con la especificación de temperatura de salida.

Se parte de unos datos iniciales, que son:

- Caudal másico de material sólido descontaminado de entrada en el transportador (m_s). Este valor es conocido siendo la suma del caudal másico de salida del desorbedor ya calculado y del caudal de partículas retenidas en el separador ciclónico y filtro de mangas, por tanto, $m_s = 9500$ (kg/h).
- Caudal másico de agua presente en el material sólido de entrada (m_{w1}), este coincide con el que lleva a la salida del desorbedor, por tanto, $m_{w1} = 47,5$ (kg/h)
- Temperatura de entrada del material sólido descontaminado (T_{S1}), la cual también coincide con la temperatura de dicho material a la salida del desorbedor, por tanto, $T_{S1} = 340$ °C.
- Temperatura de salida del material sólido descontamiando enfriado (T_{S2}). El material sólido se debe enfriar hasta un punto tal que permita mejorar la manejabilidad del mismo, por tanto, se toma una temperatura a alcanzar de salida de 50 °C, ya que el resto del enfriamiento se realiza en el almacenamiento al aire libre por convención natural.
- La temperatura de entrada del agua (T_a) empleada en la refrigeración del material sólido de entrada se toma igual a la temperatura ambiente, es decir, $T_a = 25$ °C.

Proceso de diseño del equipo.

Paso 1. Cálculo del diámetro y la velocidad de giro del tornillo.

Para seleccionar un tornillo adecuado, en primer lugar se debe identificar que tipo de material se está tratando, el cual se puede clasificar en 4 clases:

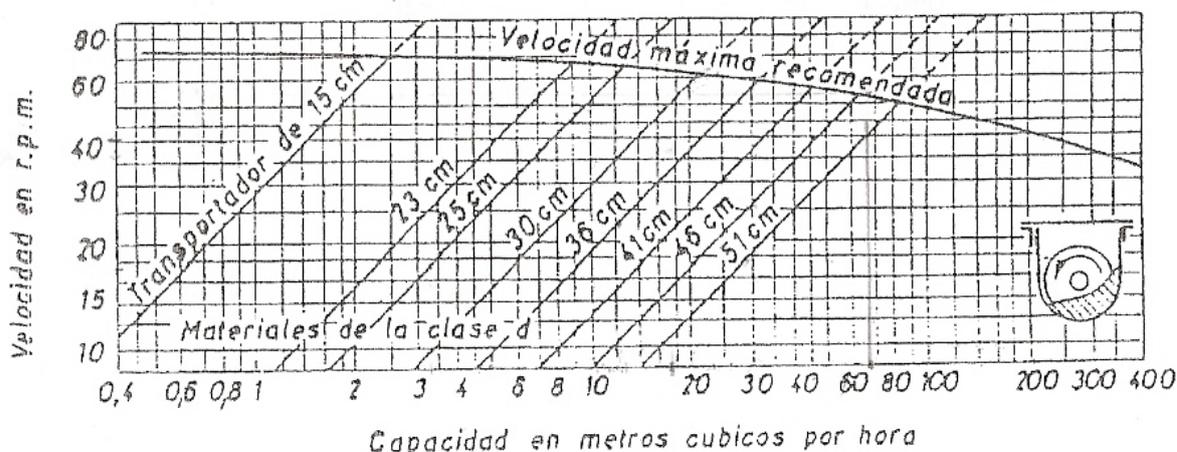
- Materiales de clase a: ligeros, finos, no abrasivos, que fluyen libremente, de 480 a 640 kg/m³.
- Materiales de clase b: no abrasivos de peso medio, granulares o pequeños terrones mezclados con finos, hasta 830 kg/m³.
- Materiales de clase c: no abrasivos o semiabrasivos, granulares o pequeños terrones mezclados con finos, de 640 a 1200 kg/m³.
- Materiales de clase d: abrasivos o semiabrasivos, finos, granulares o pequeños terrones mezclados con finos, de 830 a 1600 kg/m³.

El material descontaminado está formado en su mayor parte por arenas, por tanto se trata de un material de clase d, cuyo factor del material F varía entre 3 y 4. Se toma un factor F = 4 del lado de la seguridad en el cálculo de la potencia necesaria del equipo, como se verá más adelante.

Sabiendo el caudal másico de material sólido de entrada m_s y su densidad se calcula el caudal volumétrico de entrada, que es necesario para el cálculo posterior del diámetro del transportador de tornillo y su velocidad de giro. Como se ha dicho, el material descontaminado de entrada está formado en su mayor parte por arenas, por tanto se toma la densidad de la arena húmeda para el cálculo, es decir, $\rho_s = \rho_{arena} = 2000 \text{ kg/m}^3$. Por tanto:

$$Q_s = \frac{m_s(\text{kg/h})}{\rho_s(\text{kg/m}^3)} = \frac{9500}{2000} = 4,75(\text{m}^3/\text{h})$$

Haciendo uso de una gráfica normalizada (para material de clase d) como la mostrada a continuación, donde se representa la velocidad del tornillo en r.p.m en el eje de ordenadas frente al caudal volumétrico de diseño del material en el eje de abscisas, se calcula el diámetro del tornillo adecuado y la velocidad de giro del mismo.



De debe de tener presente dos consideraciones antes de entrar en dicha gráfica, las cuales son:

- El caudal volumétrico representado en el eje de abscisas no es el real, sino un caudal de diseño, calculado a partir del caudal real de material de entrada corregido con un factor de reducción en función de la inclinación del tornillo con respecto la horizontal, es decir, de la altura a la que dicho tornillo transporte el material. Esta relación es la siguiente:

$$Q_{real} = Q_{diseño} \cdot (1 - r)$$

donde r es la reducción de capacidad (en tanto por uno), dada en función del ángulo de inclinación del equipo.

En el caso considerado el tornillo transporta el material horizontalmente, por tanto dicha reducción es del 0 % y el caudal de diseño coincide con el caudal real de material transportado.

- La segunda consideración es que de entre todos los tornillos posibles, se debe seleccionar aquel que tenga una velocidad de giro comprendida entre el 40 y el 60 % de la velocidad máxima recomendada. Se toma aquel con una velocidad de giro más próxima al 50 % de la máxima recomendada.

Entrando en gráfica con un caudal de diseño de $4,75 \text{ (m}^3/\text{h)}$ y trazando una vertical se obtiene una velocidad máxima recomendada de 70 r.p.m y los siguientes 4 posibles tornillos:

- Tornillo de 30 cm de diámetro con una velocidad de giro de 16 r.p.m
- Tornillo de 25 cm de diámetro con una velocidad de giro de 25 r.p.m
- Tornillo de 23 cm de diámetro con una velocidad de giro de 35 r.p.m

Se busca un tornillo con una velocidad de giro próxima al 50 % de la máxima recomendada, es decir, con una $n = 35 \text{ r.p.m}$, por tanto, se selecciona uno de 23 cm de diámetro que cumple con dicha especificación de velocidad de giro.

Paso 2. Cálculo de la longitud del transportador y el caudal másico de agua de refrigeración necesario.

Se consideran boquillas a presión con un ángulo de la nube de gotas de 120° sobre el material sólido descontaminado y una distancia de las mismas al material de $h_{\text{boquilla}} = 0,2 \text{ (m)}$ (tal y como se muestra en la figura A.4.1), siendo la altura de la capa de sólidos de también $h_{\text{sólido}} = 0,2 \text{ (m)}$.

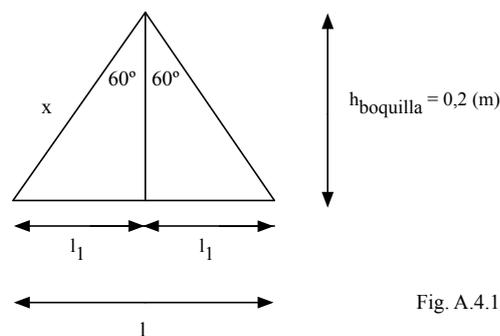


Fig. A.4.1

Por tanto,

$$x \cdot \cos 60 = 0,2 \Rightarrow x = \frac{0,2}{\cos 60} = 0,4(m)$$

$$l_1 = x \cdot \operatorname{sen} 60 = 0,4 \cdot \operatorname{sen} 60 = 0,346(m)$$

$$l = 2 \cdot l_1 = 2 \cdot 0,346 = 0,693(m)$$

es decir, cada boquilla abarca una longitud de 0,693 (m) sobre el material sólido.

Se impone un enfriamiento de 100 °C por cada metro de avance del material sólido a lo largo del transportador, por tanto la longitud necesaria para llevar el material desde $T_{S1} = 340$ °C hasta $T_{S2} = 50$ °C, es de:

$$L_{necesaria} = \frac{l(m)}{100^\circ C} \cdot (T_{S1} - T_{S2}) = \frac{1}{100} \cdot (340 - 50) = 2,9(m)$$

por lo que el número de boquillas (N) necesarias son de:

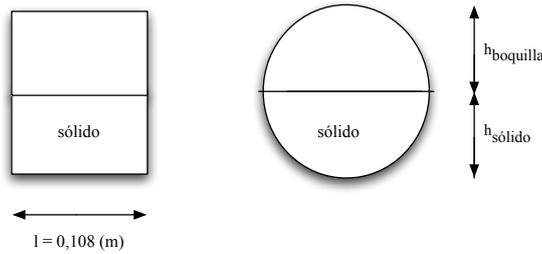
$$N = \frac{2,9}{0,693} = 4 \text{ boquillas.}$$

Para calcular la cantidad de agua necesaria para el enfriamiento del material sólido descontaminado desde la temperatura de entrada T_{S1} hasta la de salida T_{S2} se realiza un balance de energía enfocado al agua suministrada por una de las boquillas y considerando que el caudal de agua suministrado se evapora al contacto con el material hasta llegar a una temperatura del mismo de 120 °C, a partir de esta temperatura se va a considerar que desde los 120 °C hasta los 50 °C de salida la mitad del agua se evapora y la otra mitad simplemente se mezcla con el material sólido. El balance de energía queda de la siguiente forma:

$$m_{ws} \cdot C_{p,medio} \cdot \Delta T = m_v \cdot \lambda_{T_{wh}}$$

donde,

- m_{ws} es la masa de sólido húmedo (arenas en su mayor parte), la cual se calcula a partir de la geometría del transportador que se representa a continuación:



El volumen ocupado por el material sólido en la franja de proyección de una de las boquillas es de:

$$V = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot h_{sólido}^2 \cdot l = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot 0,2^2 \cdot 0,693 = 0,0435(m^3)$$

y considerando una densidad del sólido correspondiente a la arena húmeda de $\rho_s = 2000 (kg/m^3)$, se obtiene una masa de sólido húmedo de:

$$m_{ws} = V(m^3) \cdot \rho_s(kg/m^3) = 87(kg)$$

- $C_{p,medio}$ es el calor específico medio ponderado a presión constante del sólido con el agua contenida, siendo de $C_{p,medio} = 0,8 (kJ/kg \cdot K)$.

- ΔT es el decremento de temperatura que experimenta el sólido en esta franja, siendo de $100 ^\circ C$.

- m_v es la masa de agua suministrada por boquilla, la cual se evapora al contacto con el material sólido.

- λ_{Twh} es el calor latente de vaporización del agua a la temperatura de bulbo húmedo, siendo de $2454,3 (kJ/kg)$.

Por tanto, despejando del balance de energía antes propuesto se obtiene la masa de agua necesaria, siendo de $m_v = 2,83 kg$. Este valor representa la cantidad de agua suministrada por una boquilla para enfriar en $100 ^\circ C$ un masa de sólido de $87 (kg)$.

Hasta alcanzar una temperatura de $120 ^\circ C$ del material sólido se necesitan 3 de las 4 boquillas totales necesarias, tal y como se comprueba en el siguiente cálculo:

$$L_{necesaria} = \frac{l(m)}{100^\circ C} \cdot \Delta T = \frac{1}{100} \cdot (340 - 120) = 2,2(m)$$

$$N = \frac{L_{necesaria}}{l} = \frac{2,2}{0,693} = 3 \text{ boquillas.}$$

Por lo que la cantidad de agua suministrada por las 3 boquillas hasta alcanzar la temperatura de 120 °C en el material sólido es de $m_{v,total} = N \cdot m_v = 3 \cdot 2,83 = 8,49$ (kg).

El caudal de agua suministrada por las 3 boquillas (m_{ev1}) para el tratamiento del caudal másico de 9500 (kg/h) de material sólido, la cual es evaporada, es de :

$$t = \frac{m_{s,total}(kg)}{m_s(kg/h)} = \frac{N \cdot m_s}{m_s} = \frac{3 \cdot 87}{9500} = 0,0291(h)$$

$$m_{ev1} = \frac{N \cdot m_{v,total}}{t} = \frac{3 \cdot 8,49}{0,0291} = 979,22(kg/h)$$

En cuanto al resto de agua suministrada por la boquilla restante, la mitad se evapora y la otra mitad se mezcla con el sólido como ya se indicó anteriormente. Este caudal de agua denominado es de:

$$t = \frac{m_s(kg)}{m_s(kg/h)} = \frac{87}{9500} = 0,009(h)$$

$$m_a = \frac{N \cdot m_{agua}}{t} = \frac{1 \cdot 2,83}{0,009} = 311,57(kg/h)$$

por lo que $m_{ev2} = m_{w2} = m_a/2 = 155,785$ (kg/h).

Por lo que el el caudal de agua evaporada total es de $m_{ev} = m_{ev1} + m_{ev2} = 1135$ (kg/h)

Por tanto, el caudal de agua necesario para el enfriamiento del material sólido de alimentación al tornillo a razón de 9500 (kg/h) desde los 340 °C hasta los 50 °C de salida es de $m_{agua} = m_{ev} + m_{w2} = 1135 + 155,785 = 1290,78$ (kg/h).

La potencia necesaria consumida por el tornillo, se calcula como sigue:

$$P = \frac{Q \cdot L \cdot \rho \cdot F}{270 \cdot \eta} + \frac{Q \cdot \rho \cdot H}{270}$$

donde,

- P es la potencia necesaria en CV.
- L es la longitud necesaria del transportador en metros, siendo de $L_{necesaria} = 2,9$ (m).
- ρ es la densidad aparente del material en t/m^3 , siendo de $\rho = 2(t/m^3)$.
- F es el factor del material, siendo de $F = 4$.
- H es la elevación del transportador, es decir, la altura entre la boca de entrada y salida, en este caso $H = 0$ (m), por lo que el segundo término de la suma es nulo.
- η es el rendimiento mecánico del tornillo, que se toma un valor razonable de 0,3.

Por tanto, sustituyendo valores, se obtiene un valor de la potencia necesaria de:

$$P = 1,36 \text{ (CV)} = 1 \text{ (kW)}.$$

A continuación se muestra una tabla donde se recogen todas las características del transportador de tornillo diseñado :

Equipo (Denominación)	Transportador Enfriador	
Equipo origen	Horno Rotativo / Desorbedor	
Equipo destino	Cinta transportadora CT-02	
Datos del material	Suelo descontaminado	
Naturaleza		
Estado físico		Sólido
Densidad aparente (kg/m ³)		2000
Factor del material (F)		4
Datos de operación	4,75	
Capacidad de operación (m ³ /h)		
Clase de material	d	
Cálculos	1290,78	
Longitud entre bocas (m)		2,9
Inclinación		0°
Diámetro tornillo (cm)		23
Velocidad de giro (rpm)		35
Potencia (kW)		1
Número de boquillas		4
Caudal másico de agua (kg/h)		