

## **V. Equipos Auxiliares**

- **Secado de Materiales**
- **Dosificación y Manejo de Materiales**
- **Control de Temperatura de Agua al Molde**

La experiencia nos ha enseñado que un gran número de moldeadores le prestan más importancia a la máquina moldeadora y al molde, menospreciando los equipos auxiliares. Antes de iniciar el moldeo se debe tener completa seguridad de que los equipos auxiliares adjuntos al proceso son los adecuados y están ajustados apropiadamente. Entienda sus equipos y utilícelos adecuadamente, los equipos auxiliares como la secadora de materiales y las manejadoras de resinas son parte integral del proceso.

## **Secado de Materiales**

Existen materiales que necesitan ser secados antes de ser procesados. Estos materiales se conocen como materiales higroscópicos, y por la naturaleza de su química tienden a absorber el agua del ambiente. Las moléculas de agua se alojan dentro del polímero ocasionando imperfecciones en las partes moldeadas. Materiales higroscópicos comunes son PA, policarbonato, PET, ABS, etc.

El material obtiene la humedad del ambiente. Molecularmente hablando, las moléculas de los materiales higroscópicos prefieren ser acompañadas por moléculas de agua. Durante la fabricación del plástico, a altas temperaturas y presiones, el material libera agua. Una vez polimerizado y llevado a condiciones ambientales, el material quiere el agua de vuelta.

Las imperfecciones de secado más comunes son el veteado y las burbujas. El veteado, al igual que las burbujas, son regularmente perceptibles a la simple vista. El veteado se presenta en forma de vetas descoloradas en la dirección del flujo. Las burbujas son el producto del agua en forma de vapor que termina siendo atrapado en las piezas moldeadas. Un método utilizado para identificar este tipo de burbujas es calentando las piezas moldeadas, ya que las burbujas, a consecuencia de la humedad, tienen la particularidad de expandir o crecer cuando se calienta la pieza a temperaturas cerca de la deformación del plástico.

Las burbujas debilitan las piezas moldeadas, estas se convierten en puntos de concentración de esfuerzos que podrían convertirse en fracturas una vez la pieza moldeada es expuesta a pruebas de funcionalidad.

Existen materiales no higroscópicos que requieren ser secados, por ejemplo, piezas que demandan alta claridad. La resina es a veces secada

con el propósito de maximizar la translucencia. Ahora este tipo de humedad se remueve con calor, ya que la humedad en el material es superficial.

La mecánica del secado se basa en cuatro factores:

- aire extremadamente seco
- temperatura de secado
- flujo de secado
- tiempo de secado

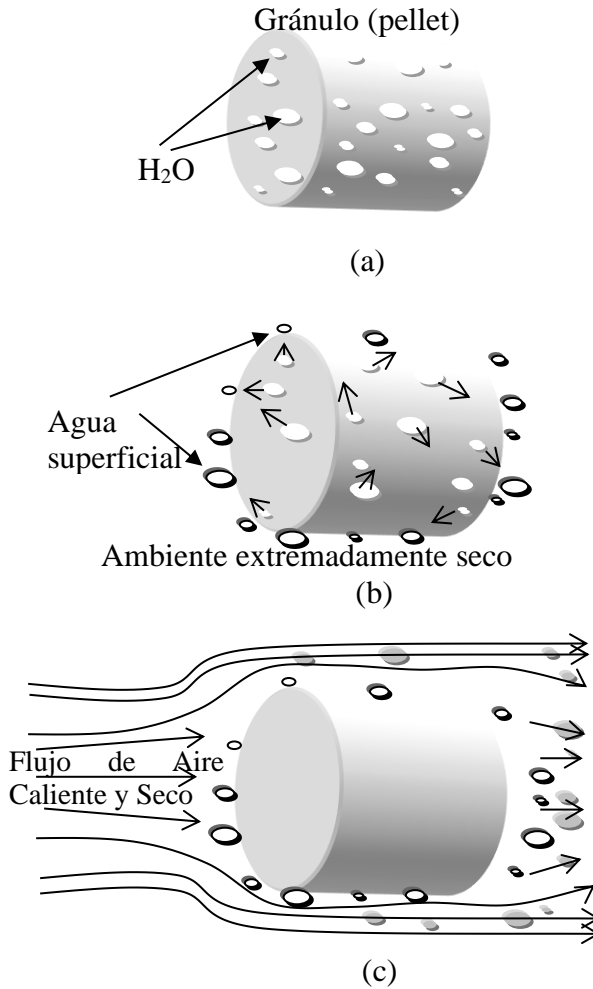
### **Aire extremadamente seco**

Se debe crear un ambiente con aire extremadamente seco. El agua es forzada a salir a la superficie del plástico por medio de un aire sediento en búsqueda de humedad. Este aire es tan seco que ningún ser humano podría vivir en él. Esto se consigue manteniendo una temperatura de condensación (temperatura de rocío o “dew point”) menor de  $-30^{\circ}\text{C}$  ( $-20^{\circ}\text{F}$ ). La temperatura de condensación es el punto en que el vapor de agua que existe en el aire se condensa. Por ejemplo, el rocío de la mañana es consecuencia de la condensación de agua ocasionada por la caída de temperatura nocturna.

### **Temperatura de secado**

La secadora, además de un aire superseco, requiere de un aire caliente que ayude a extraer el agua a la superficie y que sea capaz de evaporar el agua. Esta temperatura del aire se conoce como temperatura de secado y depende del material. Por ejemplo, el policarbonato requiere una temperatura de secado de alrededor de  $121^{\circ}\text{C}$  ( $250^{\circ}\text{F}$ ).

## Flujo de secado



### V-1. Mecánica del secado de termoplástico

- (a) gránulo ("pellet") de termoplástico con humedad alojada dentro del plástico.
- (b) Un ambiente extremadamente seco fuerza las moléculas de agua a salir a la superficie.
- (c) Un flujo de aire seco y caliente evapora el agua superficial y la remueve en forma de vapor.

Se necesita suficiente flujo de aire para remover el vapor de agua de la tolva de secado. Este flujo de aire superseco y caliente es el responsable de transportar el vapor de agua fuera del material.

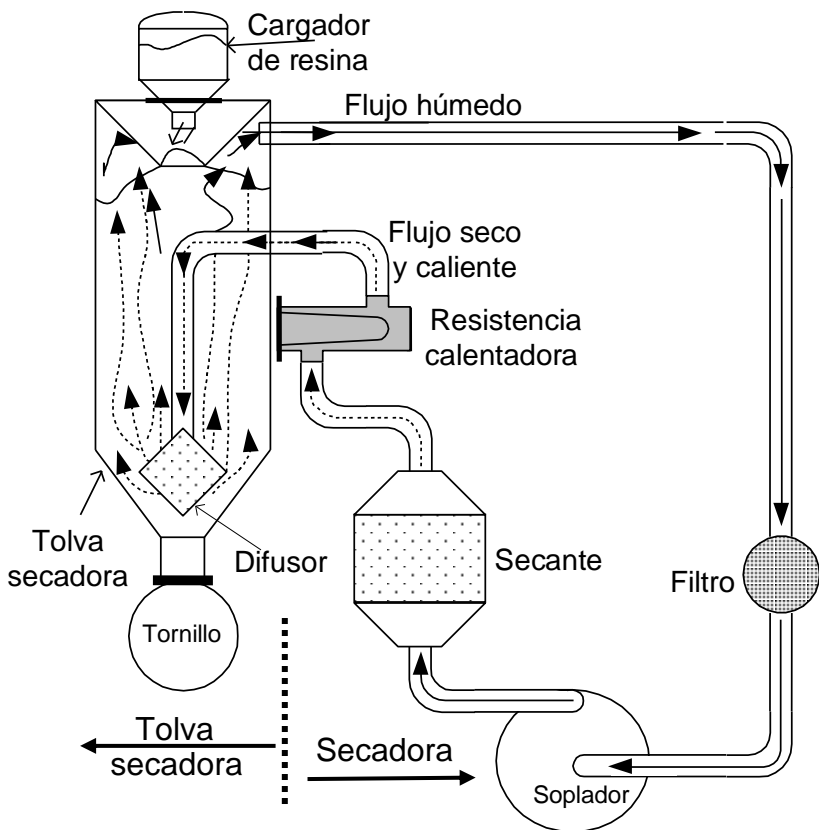
Las unidades del flujo más comunes son: metros cúbicos por minuto ( $\text{m}^3/\text{min}$ ) y pies cúbicos por minuto (cfm). Este flujo depende del tipo de material y del consumo de material. Por ejemplo, PA (nilón) necesita un flujo de aire seco de 2 litros/min (0.90 cfm) por cada 1 kg/h (1 lb/h) de material.

### **Tiempo de secado**

El proceso de secado es paulatino y requiere de suficiente tiempo de secado para completar la remoción de humedad. En otras palabras, desde que el material entra a la secadora tiene que transcurrir un tiempo definido para que la resina sea expuesta a un flujo de aire seco y caliente hasta que se complete el proceso de secado. El tiempo de secado depende del material; por ejemplo, policarbonato necesita 4 horas de secado. Existen muchos textos que resumen los valores de tiempo, flujo, y temperatura de secado. Aun así, corroboren con la ficha técnica que provee el fabricante de la resina.

### **Componentes del equipo de secado**

Los componentes principales del circuito de secado son la tolva de secado (“drying hopper”) y la secadora.



## V-2. Tolva de secado y secadora

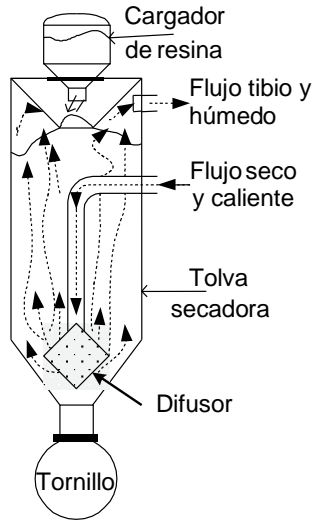
### Tolva secadora

La tolva secadora se constituye de la entrada de aire caliente y superseco, el difusor de aire superseco y caliente, el retorno de aire húmedo y tibio, la descarga, y el cargador de resina.

La resina plástica reside en la tolva secadora mientras la humedad es removida. Aire caliente y extremadamente seco es forzado en la tolva y distribuido a través de la resina plástica por un difusor. El aire caliente y seco remueve la humedad y la transporta fuera de la tolva. El flujo de aire húmedo y tibio retorna a la secadora.

Se presume que durante el secado se pierden unos 56°C (100°F) de temperatura. Esta información será utilizada más adelante.

Una vez removida la humedad, el material está listo para ser inyectado.



### V-3. Tolva secadora

#### Tamaño de la tolva secadora

El tamaño de la tolva tiene que ser de un tamaño adecuado para garantizar el tiempo de secado. Por ejemplo, un proceso de alto consumo demanda de una tolva secadora de mayor volumen que un proceso de bajo consumo con el mismo material.

Las tolvas de secado se identifican por su volumen y aunque algunos fabricantes utilizan la unidad lb o kg para identificar las tolvas, la forma apropiada es volumen, como  $\text{ft}^3$  o litros.

Para determinar el tamaño de la tolva secadora se requiere saber:

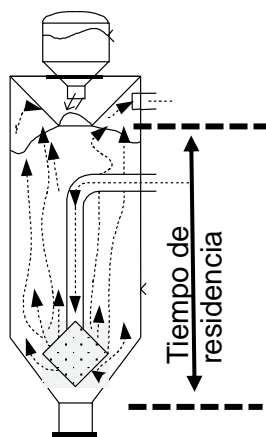
- el consumo de material, en lb/h o en kg/h,
- el tiempo de secado en horas de secado, y
- la densidad granel de la resina plástica, en  $\text{lb/ft}^3$  o en  $\text{kg/m}^3$ .

El consumo de material proviene del proceso. Por ejemplo, una moldeadora que inyecta partes y coladas con un peso total de 53 gramos cada 14 segundos nos da un consumo de:

$$\begin{aligned}\text{Consumo} &= 53\text{g} / 14\text{s} = 3.79 \text{ gr/s} = 13.6 \text{ kg/h} \\ &= 30 \text{ lb/h}\end{aligned}$$

## Tiempo de secado

El tiempo de secado lo dicta el material que se va a secar. Por ejemplo, un policarbonato donde el fabricante especifica 4 horas de secado significa que el material debe residir más de cuatro horas dentro de la tolva secadora antes de ser moldeado. En otras palabras, el material que entra por la parte superior se debe demorar 4 horas antes de ser inyectado. El tiempo de secado considera el tiempo que reside el material dentro de la tolva secadora.



### *V-4. Volumen/tiempo de residencia*

## Densidad granel

Este valor lo provee el suplidor de la resina y representa el espacio que ocupa la resina en su estado granular. No la confunda con la densidad del material después de moldeado; recuerde que la densidad granular considera los espacios vacíos entre los granos de la resina. Las unidades más comunes de la densidad granel son  $\text{kg/m}^3$  o en  $\text{lb/ft}^3$ . Por ejemplo, un policarbonato con una densidad de  $52 \text{ lb/ft}^3$  ( $833 \text{ kg/m}^3$ ) en un envase de unos pies (metro) cúbico, lleno de resina, ocuparía 52 lb (833 kg) de ese policarbonato.

Ejemplo:

Una inyectora consume  $30 \text{ lb/h}$  ( $13.5 \text{ kg/h}$ ) de policarbonato con una densidad granular de  $52 \text{ lb/ft}^3$  ( $833 \text{ kg/m}^3$ ) que requiere ser secado por 4 horas.

Utilizando la ecuación y sustituyendo:



$$\text{Volumen} = [\text{Consumo} \times (\text{Tiempo de secado}) / (\text{Densidad granel})]$$

$$V = 30(\text{lb/h})4(\text{h}) / 52(\text{lb/ft}^3) = \mathbf{2.3\text{ft}^3}$$

Obtenemos que este proceso requiere de una tolva secadora mayor de 2.3 ft<sup>3</sup> (65 litros).

Si el proceso utiliza material reprocesado o molido habría que considerar que parte de ese material es de otra densidad granel, ya que no es de forma granular como el material virgen. En adición a la densidad granel del molido se necesitaría la proporción de material virgen/molido.

Consideremos el ejemplo anterior con 20% de material molido:

Consumo = 30 lb/h, 80% virgen y 20% molido

Densidad material virgen = 52 lb/ft<sup>3</sup>

Densidad material molido = 36 lb/ft<sup>3</sup>

Tiempo de secado = 4 horas

Utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Volumen} = T \times C [ \% V \div D_{\text{virgen}} + \% M \div D_{\text{molido}} ]$$

Donde:

T = tiempo de secado

C = consumo de resina

D<sub>virgen</sub> = densidad del virgen

D<sub>molido</sub> = densidad del molido

%M = % del molido

%V = % del virgen

Sustituyendo los valores:

$$\begin{aligned} \text{Volumen} &= 4 \text{ horas} \times 30 \text{ lb/h} [ 0.8 \div 52 \text{ lb/ft}^3 + 0.2 \div 36 \text{ lb/ft}^3 ] \\ &= \mathbf{2.51 \text{ ft}^3} \end{aligned}$$

Obtendríamos una necesidad de una tolva mayor de 2.51 ft<sup>3</sup>. Este volumen es más grande que del ejemplo con 100% resina virgen de 2.3 ft<sup>3</sup>. Esto es de esperarse ya que el material molido ocupa más espacio que el material virgen. Recuerden que la forma del material molido es una mezcla de hojuelas, tiras y polvo y el material virgen es de granos compactos.

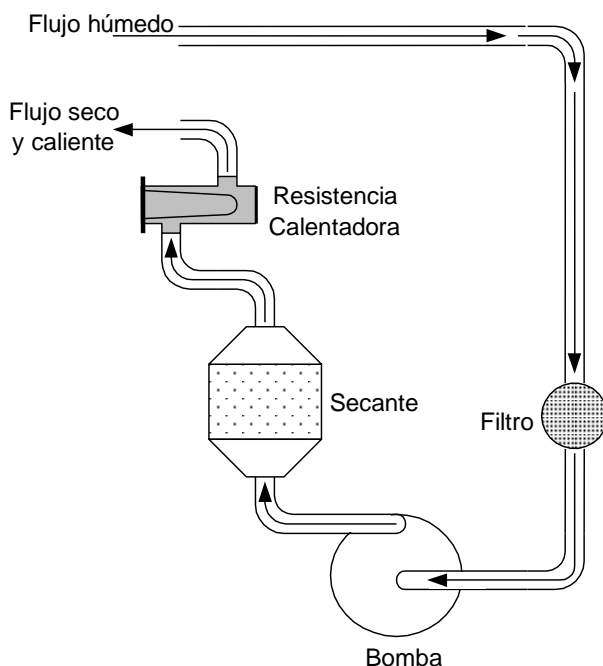
## Cargador de resina

El propósito del cargador de resina es mantener la tolva de secado llena de material. La tolva secadora debe estar siempre llena de resina. Si la tolva se vacía accidentalmente, por ejemplo, hasta la mitad, y luego es llenada es probable que el material que se llenó no esté completamente seco al momento de ser moldeado, ya que no residió en la secadora el tiempo de secado requerido por el material.

## Secadora

La secadora la constituye el filtro, la bomba (“blower”), la recámara con material secante, y la resistencia de calor en el circuito de secado.

La secadora garantiza un flujo de aire seco y caliente. El flujo de aire húmedo que retorna de la tolva secadora es secado y calentado antes de ser devuelto a la tolva secadora.



V-5. Circuito de secado

## El filtro

El flujo húmedo que retorna de la tolva secadora pasa por un filtro, evitando que polvo de plástico contamine el material secante. Es de extrema importancia que se examine el elemento filtrante, que se mantenga limpio y que se remplace según las especificaciones del fabricante. Un filtro tupido obstruye el flujo del aire, y consecuentemente reduce la capacidad de secado de la secadora. Además, un filtro perforado permite el paso de partículas de plástico hasta el material secante y lo dañaría.

## Bomba (“blower”)

El aire húmedo, tibio, y filtrado llega hasta la bomba. La bomba es la responsable de mantener un flujo constante a través del sistema. Recuerden que cada proceso requiere un flujo específico y es una función del tipo de material y del consumo de resina.

El factor de flujo máximo es:

$$\begin{aligned} 1 \text{ cfm} &\rightarrow 1 \text{ lb/h de material} \\ 63 \text{ litro/min} &\rightarrow 1 \text{ kg/h de material} \end{aligned}$$

Este factor de flujo es el máximo, consulte al suplidor de la resina y obtenga el valor real.

Por ejemplo:

Un policarbonato marca X se utiliza en un proceso que consume 50 lb/h.

$$\text{Flujo} = \text{Factor} \times \text{Consumo}$$

Si no tenemos el factor de flujo del fabricante, asumimos un factor de 1 cfm/lb/h y calculamos:

$$\text{Flujo} = (1 \text{ cfm/lb/h}) \times (50 \text{ lb/h}) = \mathbf{50 \text{ cfm}}$$

Ahora si conocemos el factor de flujo, asumamos que es 0.95 cfm/lb/h obtendríamos:

$$\text{Flujo} = (0.95 \text{ cfm/lb/h}) \times (50 \text{ lb/h}) = \mathbf{47.5 \text{ cfm}}$$

El factor de flujo máximo es más seguro, pero no es real. Si está corroborando un proceso existente y quiere un valor de corroboración rápido, utilice el factor máximo. Si durante su rápida verificación el flujo

calculado es menor que el flujo capaz de la secadora existente, entonces la secadora es adecuada. Ahora, si está seleccionando una secadora para un proceso, haga sus cálculos con el factor de flujo real.

### **Recámara secante**

La recámara contiene un material secante que remueve la humedad del aire. Esta recámara o recámaras vienen instaladas en la secadora de un tamaño adecuado. El equipo llega con la recámara secante adecuada para ese equipo.

Ahora, es importante asegurarse de que el aire húmedo que entra a la recámara secante esté a una temperatura menor de 65°C (150°F), ya que si el retorno de aire húmedo que proviene de la tolva secadora está por encima de 65°C (150°F) el secante **NO** funcionará. En el evento de que el aire húmedo retorne a la secadora por encima de 65°C (150°F) un intercambiador de calor debe ser agregado al sistema para reducir la temperatura del aire de retorno.

Si está seleccionando una secadora, verifique si necesita o no un intercambiador de calor en el retorno de aire húmedo de la secadora. Se mencionó anteriormente que se asume que durante el secado se pierden unos 56°C (100°F) de temperatura. De acuerdo con esta información seleccione el material con mayor temperatura de secado que usted considera utilizar en esa secadora, y réstele 56°C (100°F). Así sabrá si el retorno de aire húmedo está por encima de los 65°C (150°F).

Por ejemplo: con un PET de marca XY, el fabricante especifica que se debe secar a 160°C (320°F). ¿Necesita o no el intercambiador de calor? Si le restamos a la temperatura de secado 56°C, obtenemos:

$$\text{Temperatura de retorno} = 160^{\circ}\text{C} - 56^{\circ}\text{C} = \mathbf{104^{\circ}\text{C}}$$

Entonces 104°C es mayor que 65°C, consecuentemente requerirá de un intercambiador de calor.

Si ha notado que 100°F no es igual 56°F, no es un error, estamos hablando de cambio en temperatura Delta. Por esto cuando se convierte un cambio Delta de Fahrenheit a Celsius se hace multiplicando el cambio en Fahrenheit por 5/9. Si el cambio de temperatura es de Celsius a Fahrenheit

se multiplica el cambio en Celsius por 9/5. Únicamente aplique esta conversión cuando se trata de un Delta en temperatura.

### **Resistencia de calor**

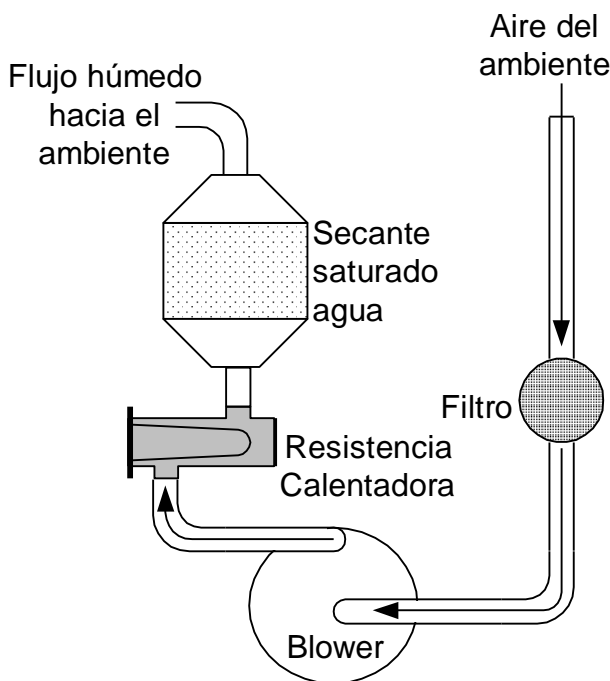
Finalmente, el aire seco que sale de la secante es calentado a una temperatura requerida por el material, y enviado a la tolva de secado. La resistencia de calor encenderá automáticamente, manteniendo la temperatura ajustada por el técnico del equipo. No hay que hacer cálculos para determinar el tamaño de la resistencia de calor, afortunadamente el equipo llega con la resistencia de calor adecuada para esa secadora.

Una vez el material secante se satura de agua, este se lleva a un circuito de regeneración.

### **Regeneración**

El secante no puede estar removiendo humedad perpetuamente, eventualmente se va a saturar de agua. En la etapa de regeneración, la recámara saturada es cambiada automáticamente por una seca y la saturada cambia a una etapa de secado.

Los componentes del circuito de regeneración son la entrada de aire del ambiente, el filtro de partículas, la bomba (“blower”), la resistencia de regeneración, la recámara con secante saturado de agua, y la descarga al ambiente.



#### *V-6. Circuito de regeneración*

En esta etapa de regeneración aire caliente, sobre 200°C (400°F), es forzado a través del material secante, removiendo la humedad y descargándola al ambiente. Es por esto por lo que los filtros se deben mantener siempre limpios y sin perforaciones, impidiendo que el polvo de plástico llegue al material secante. Ese aire de regeneración es tan caliente que puede fundir la mayoría de los plásticos, y ese fundido cubriría el secante dañándolo. Una vez secada, la recámara entrara a una etapa de enfriamiento, esperando por el relevo de otra recámara saturada.

El equipo efectúa esta operación automáticamente. El método depende del fabricante del equipo. Algunos lo hacen por un tiempo fijado en el control del sistema. Otros controladores lo hacen midiendo la temperatura de descarga al ambiente; cuando la temperatura de descarga sube a cierto nivel indica que el flujo de aire caliente dejó de remover humedad.

El fabricante del equipo es quien recomienda la frecuencia con que se cambia el material secante. Muchos recomiendan que se cambie anual, otros recomiendan que se remplace únicamente cuando la temperatura de condensación ("dew point") del flujo exceda -30°C (-20°F).

No todo equipo incluye un medidor de temperatura de condensación y, aunque es una excelente herramienta, es opcional en mucho de los equipos. Si sus secadoras no están provistas de un medidor de temperatura de condensación, considere adquirir una unidad portátil.

El cambio a regeneración de las cámaras secantes varía con el tipo de secadora. Puede ser por medio de válvulas que cambian la dirección del flujo, por medio de recámaras secantes que rotan en un carrusel, por medio de una rueda secante sólida que rota continuamente, etc.

Un equipo operando con una temperatura de condensación de  $-40^{\circ}\text{C}$  ( $-40^{\circ}\text{F}$ ) no necesariamente significa que el material esté listo para ser moldeado. Una temperatura de condensación de  $-40^{\circ}\text{C}$  significa que el aire que fluye por la secadora está superseco. Aun así, no es una garantía de que el material esté listo para ser moldeado.

Existen equipos que miden el contenido de agua en la resina. Estos básicamente operan comparando el peso de la resina antes y después de evaporar el contenido de agua por medio de calor.

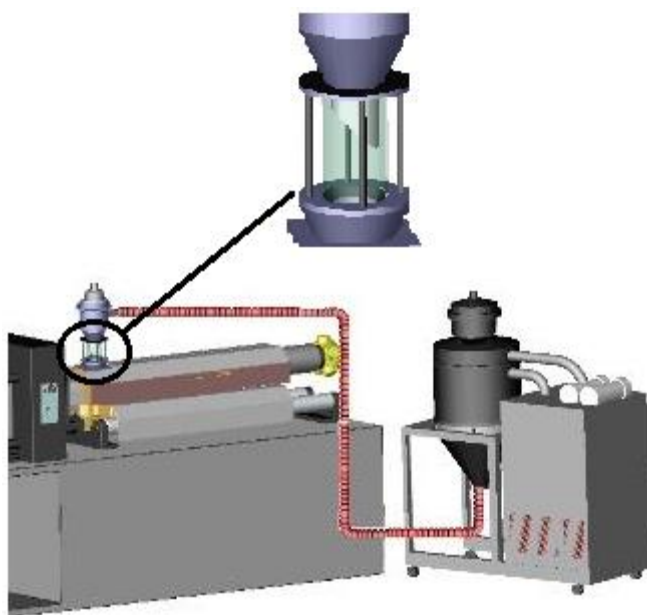
Además, existen secadoras que no utilizan material secante y únicamente operan con calor, estas están limitadas a materiales no higroscópicos. Otras operan combinando aire caliente y presiones negativas. Me explico; disminuyendo la presión en un recipiente sellado se consigue disminuir la temperatura de evaporación del agua y mejorar la extracción de la humedad del material. Verifique con su proveedor de resina; ¿Cuál es la mejor secadora para su aplicación?

### **Configuración de sistemas de secado**

Existen distintas configuraciones: unidad portátil, tolva sobre extrusora, unidad integrada y secado central.

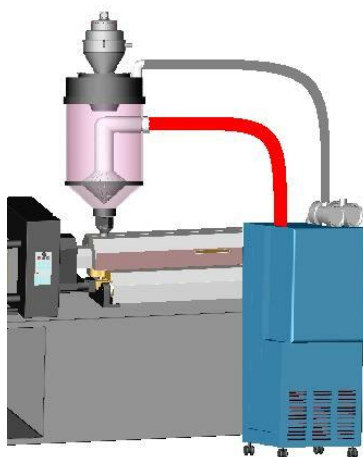
- **Unidad portátil**

La unidad portátil ofrece la ventaja de que su uso no tiene que estar necesariamente dedicada a una extrusora. El cargador que transporta el material hasta la inyectora succiona con una cantidad restringida de material seco. Recuerden que una vez el material es removido de la secadora, el material está expuesto a absorber humedad.



*V-7. Unidad portátil*

- **Tolva sobre extrusora**



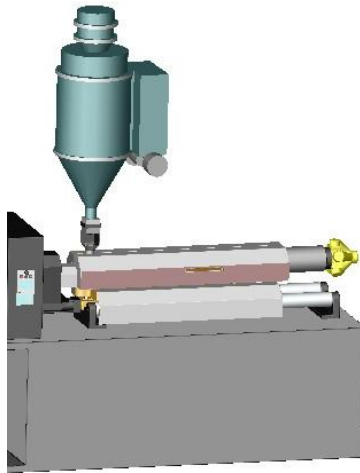
*V-8. Tolva sobre la extrusora*



La tolva sobre la extrusora reduce el riesgo de que el material obtenga humedad del ambiente, ya que el material seco va directamente de la tolva de secado a la extrusora.

- **Unidad integrada**

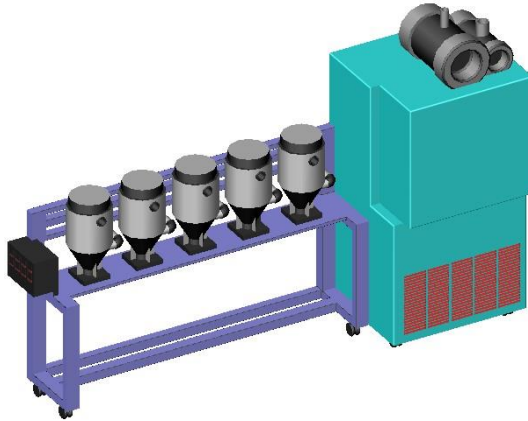
La unidad integrada es donde la secadora y la tolva secadora están ensambladas juntas. Este sistema se monta sobre la unidad de inyección y, al igual que la tolva sobre la extrusora, reduce el riesgo de que el material obtenga humedad del ambiente. Su mayor atractivo es que no ocupa espacio en el piso de la fábrica.



*V-9. Unidad integrada*

- **Secadora central**

La secadora central conecta múltiples tolvas de secado a un secador común.



*V-10. Secadora central*

El mayor atractivo es que localiza y centraliza el secado en un lugar común para múltiples máquinas. Este sistema facilita el cambio de materiales, ocupa poco espacio y confina el área de secado a un lugar específico.

Para cada molde que utiliza termoplástico higroscópico se le debe determinar el equipo secador correspondiente. Vea el ejercicio a continuación.

### **Ejemplo:**

Material → Policarbonato

Consumo → 50 lb/h, 80% virgen y 20% molido

Utilice las tablas a continuación de:

- *Materiales y sus parámetros de secado*
- *Materiales y sus densidades a granel*
- *Flujo de aire seco requerido*

Densidad  $\rho$  material virgen = 40 lb/ft<sup>3</sup>

Densidad  $\rho$  material molido = 36 lb/ft<sup>3</sup>

$T = 250$  a  $270^\circ F$

$t_s = 4$  h

Razón de flujo = 0.95 (ft<sup>3</sup>/min) /(lb/h)

(Siempre consulte el fabricante del material)

### **Determinando la tolva secadora:**

Volumen =  $t_s \times \text{Consumo } (\% \text{ Virgen} \div \rho_{\text{virgen}} + \% \text{ Molido} \div \rho_{\text{molido}})$

$$= 4 \times 50(0.8 \div 40 + 0.2 \div 36) = \mathbf{5.1 \text{ ft}^3}$$

**Tamaño secador:**

$$\text{Flujo} = \text{Razón} \times \text{Consumo} = 0.95 \times 50 = \mathbf{47.5 \text{ ft}^3/\text{min}}$$

**Sistema recomendado:**

- Secadora con un flujo mínimo de 47.5 ft<sup>3</sup>/min
- Tolva secadora con un tamaño mínimo de 5.1 ft<sup>3</sup>
- Temperatura de secado de 250°F
- Intercambiador de calor para reducir temperatura de retorno

Nombre Común	Descripción	Higroscópico	Horas de Secado	Temperatura de Secado °F
ABS/PVC	ABS/PVC Alloy	Si	2-3	160 - 170
ABS (Molding Grade)	Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Thermopolymer	Si	2-4	190 - 220
ABS/PC	ABS/Polycarbonate Alloy	Si	4-5	220 - 230
Acetal (copolymer)	Acetal Resin	Si	2-3	200 - 220
Acetal (homopolymer)	Acetal Resin	No	1-2	200 - 220
Acrylic	Methyl Methacrylate	Si	2-3	170 - 190
CA (Acetate)	Cellulose Acetate	Si	2-3	160 - 180
CAB (Butyrate)	Cellulose Acetate/Butyrate	Si	2-3	160 - 180
CAP (Propionate)	Cellulose Acetate/Propionate	Si	2-3	160 - 180
EVOH	Ethylene-Vinyl Alcohol Copolymer	Si	2-3	195 - 225
HDPE	High Density (Linear) Polyethylene	No	1-2	160 - 180
HDPE w/max 3% black	High Density (Linear) Polyethylene	Si	3-4	160 - 180
HDPE w/max 4% black	High Density (Linear) Polyethylene	Si	4-5	160 - 180
Ionomer	Ionomer Resin	Si	7-8	150 - 160
LCP	Liquid Crystal Polymer (Aromatic Polyester)	Si	3-4	300 - 310
LDPE	Low Density (Conventional Polyethylene)	No	1-2	160 - 180
LDPE w/max 3% black	Low Density (Conventional Polyethylene)	Si	3-4	160 - 180
LDPE w/max 40% black	Low Density (Conventional Polyethylene)	Si	4-5	160 - 180
Nitrile	Acrylonitrile Terpolymer	Si	5-6	160 - 180
Nylon 6, 6/6, 6/12	Crystalline Nylon (Caprolactan)	Si	5-6	160 - 180
Nylon (Amorphous)	Super Tough Nylon	Si	4-5	180 - 190
Nylon (Transparent)	Transparent Nylon	Si	4-5	180 - 190
OSA	Olefin-Modified Styrene-Acrylonitrile Copolymer	Si	2-3	180 - 190
PBT	Polybutylene-Terephthalate Copolymer	Si	2-3	250 - 270
PBT/PET	PBT/PET Alloy	Si	4-5	350 - 370
PC	Polycarbonate	Si	3-4	250 - 270

*V-11. Tabla de materiales y sus parámetros de secado*

Nombre Común	Descripción	Higroscópico	Horas de Secado	Temperatura de Secado °F
PC/PBT/E	Polycarbonate/PBT/Elastomer Alloy	Si	3-4	220-230
PCS	Polycarbonate-Styrene Copolymer	Si	2-3	220-230
PCTA	Cyclohexane-Terephthalate Copolymer	Si	3-4	160-180
PEEK	Polyetheretherketone	Si	3-4	300-320
PEM	Polyetherimide	Si	6-7	300-310
PES	Polyethersulfone	Si	3-4	300-320
PET (Molding Grade)	Polyethylene-Terephthalate (Polyester)	Si	2-4	250-270
PETG	Amorphous PET Copolymer	Si	3-4	140-150
Polyarylate	Amorphous Aromatic Polyester	Si	5-6	250-260
Polysulfone	Polyether, Polyarylsulfone	Si	4-5	250-260
Polyurethane	Polyurethane Elastomer	Si	2-3	180-200
PP	Polypropylene	No	1-2	170-190
PPA	Polyphtalamide	Si	6-7	175-180
PPC	Polyphtalate Carbonate	Si	3-4	260-270
PPO	Polyphenylene	Si	2-4	200-250
PPS	Polyphenylene Sulfide	Si	3-4	280-290
PPS (40% Glass)	Polyphenylene Sulfide	Si	3-4	300-320
PS (Styrene)	Polystyrene	No	1-2	180-190
PTMT	Polytetramethylene-Terephthalate	Si	2-3	210-220
PVC (Flexible)	Polyvinyl-Chloride	No	1-2	160-180
PVC (Rigid)	Polyvinyl-Chloride	No	1-2	160-180
SAN	Styrene-Acrylonitrile	Si	3-4	180-190
SAN (Modified)	Styrene-Acrylonitrile (with Olefin Elastomer)	Si	3-6	160-180
SMA	Styrene-Maleic Anhydride	Si	2-3	200-210
TPE	Thermoplastics Polyester	Si	2-3	210-220
TPR	Thermoplastic Rubber	Si	2-3	150-170
XT	Impact-Modified Acrylic Resin	Si	3-4	170-190

*V-11a. Tabla de materiales y sus parámetros de secado (cont.)*

**Nota:** Estos valores son una guía, siempre consulte con el fabricante del material.

Nombre Común	Descripción	Densidad lbs/ff Virgen	Densidad lbs/ff Molido
ABS/PVC	ABS/PVC ALLOY	45	35
ABS (Molding Grade)	Acrylonitrile-Butadiene- Styrene Termopolimer	42	32
ABS/PC	ABS/Polycarbonate Alloy	40	32
Acetal (copolymer)	Acetal Resin	40	35
Acetal (Homopolymer)	Acetal Resin	40	32
Acrylic	Methyl Methacrylate	42	36
CA (Acetate)	Cellulose Acetate	38	32
CAB (Butyrate)	Cellulose Acetate/Butyrate	39	33
CAP (Propionate)	Cellulose Acetate / Propionate	40	34
EVOH	Ethylene-Vinyl Alcohol Copolymer	36	32
HDPE	High Density (Linear) Polyethylene	35	28
HDPE w/max 3% black	High Density (Linear) Polyethylene	34	26
HDPE w/max 40% black	High Density (Linear) Polyethylene	34	26
Ionomer	Ionomer Resin	44	36
LCP	Liquid Crystal Polymer (Aromatic Polyester)	50	46
LDPE	Low Density (Conventional) Polyethylene	32	24
LDPE w/max 3% black	Low density (Conventional) Polyethylene	32	24
LDPE w/max 40% black	Low Density (Conventional) Polyethylene	32	24
Nitrile	Acrylonitrile Terpolymer	40	32
Nylon 6, 6/6, 6/12	Crystalline Nylon (Caprolactan)	41	35
Nylon (Amorphous)	Super Tough Nylon	42	36
Nylon (Transparent)	Transparent Nylon	41	35
OSA	Olefin-Modified Styrene- Acrylonitrile Copolymer	42	36
PBT	Polybutylene-Terephthalate Copolymer	52	44
PBT/PET	PBT/PET Alloy	50	44
PC	Polycarbonate	40	36

V-12. Tabla de materiales y sus densidades granel

Nombre Común	Descripción	Densidad lbs/ft <sup>3</sup> Virgen	Densidad lbs/ft <sup>3</sup> Molido
PC/PBT/E	Polycarbonate/PBT/Elastomer Alloy	42	38
PCS	Polycarbonate-Styrene Copolymer	38	34
PCTA	Cyclohexane-Terephthalate Copolymer	52	44
PEEK	Polyetheretherketone	52	44
PEM	Polyetherimide	52	46
PES	Polyethersulfone	52	46
PET (Molding Grade)	Polyethylene-Terephthalate(Polyester)	54	46
PETG	Amorphous PET Copolymer	50	40
Polyarylate	Amorphous Aromatic Polyester	50	44
Polysulfone	Polyether, Polyarylsulfone	50	44
Polyurethane	Polyurethane Elastomer	48	42
PP	Polypropylene	33	27
PPA	Polyphthalamide	48	40
PPC	Polyphthalate Carbonate	50	44
PPO	Polyphenylene	50	44
PPS	Polyphenylene Sulfide	50	44
PPS (40% Glass)	polyphenylene Sulfide	50	44
PS (Styrene)	Polystyrene	35	27
PTMT	Polytetramethylene-Terephthalate	50	44
PVC (Flexible)	Polyvinyl-Chloride	48	34
PVC (Rigid)	Polyvinyl- Chloride	50	32
SAN	Styrene-Acrylonitrile	40	34
SAN (Modified)	Styrene-Acrylonitrile(with Olefin Elastomer)	42	36
SMA	Styrene-Maleic Anhydride	38	32
TPE	Thermoplastics Polyester	48	42
TPR	Thermoplastic Rubber	48	42
XT	Impact-Modified Acrylic Resin	40	36

*V-12a. Tabla de materiales y sus densidades granel (cont.)*

**Nota:** Estos valores son una guía, siempre consulte con el fabricante del material.

<b>Material</b>	<b>Higroscópico</b>	<b>Pies<sup>3</sup>/minutos por lb/h</b>
ABS	Sí	0.75
Acetal	Sí	0.80
Acrílico	Sí	0.95
PA (Nilón)	Sí	0.90
PBT	Sí	0.80
PC	Sí	0.95
PET	Sí	1.00
PPO	Sí	0.80
SAN	Sí	0.80
TPE	Sí	0.80
Acetal (homopolímero)	No	0.75
HDPE	No	0.75
LDPE	No	0.75
Polipropileno	No	0.75
Poliestireno	No	0.75
PVC	No	0.75

*V-13. Flujo de aire seco requerido, por cada lb/h de consumo de material*

**Nota:** Estos valores son una guía, siempre consulte con el fabricante del material.

## Preguntas

- 1) ¿Cuáles son los cuatro factores que gobiernan el secado?
  - a. tiempo de secado, presión del aceite, flujo de aire y temperatura de secado
  - b. tiempo de secado, aire superseco, flujo de aire y temperatura de secado
  - c. tiempo de secado, aire húmedo, flujo de aire y temperatura de secado
- 2) En el secado de materiales higroscópicos la temperatura de condensación es:
  - a. la temperatura a la que se seca el material.
  - b. la temperatura del ambiente.
  - c. la temperatura a la que el agua, que existe en el flujo de secado, se condensa.
- 3) Marque todas las oraciones correctas.
  - a. La temperatura de secado es específica para un tipo de material.
  - b. La temperatura de secado es la temperatura a la que el vapor de agua se condensa.
  - c. El nombre anglosajón de la temperatura de condensación es temperatura “dew point”.
  - d. El flujo de secado es fijado a 15 cfm para todo tipo de secadora comercial.
  - e. El fabricante del material especifica variables tales como temperatura, tiempo y flujo de secado.
- 4) Se secan únicamente los materiales higroscópicos.
  - a. Cierto – Únicamente higroscópicos que requieren alta claridad son secados.
  - b. Falso –Algunos materiales que requieren alta claridad son secados con el propósito de mantener su translucidez.
- 5) La densidad granel considera los huecos o vacíos entre los granos o “pellets”.
  - a. Cierto
  - b. Falso, el espacio es despreciable.



6) Un material requiere ser secado por 4 horas a una temperatura de  $265^{\circ}\text{F}$  a un consumo de 50 lb/h. La densidad granel del material es  $40\text{lb/ft}^3$ . La secadora debe tener un volumen de:

- a.  $40\text{ lb/h} \times 4 = 160\text{ ft}^3$
- b.  $50\text{ lb/h} \times 4\text{ horas} / 40\text{ lb/ft}^3 = 5\text{ ft}^3$
- c.  $265\text{ ft}^3$

7) Un material requiere ser secado por 4 horas en un proceso de 30 lb/h, la densidad granel del material virgen es  $40\text{ lb/ft}^3$ . Considerando que 20% es material molido con una densidad granel de  $36\text{ lb/ft}^3$ , determine el volumen de la tolva secadora.

- a.  $\text{volumen} = 4\text{ horas} \times 30\text{ lb/h} \times 36\text{ lb/ft}^3$
- b.  $\text{volumen} = 4\text{ horas} \times 30\text{ lb/h} \times 40\text{ lb/ft}^3$
- c.  $\text{volumen} = 4\text{ horas} \times 30\text{ lb/h} [0.8 \div 40\text{ lb/ft}^3 + 0.2 \div 36\text{ lb/ft}^3]$

8) Un material que demanda una temperatura de secado de  $260^{\circ}\text{F}$  no requiere del uso de un intercambiador de calor en la línea de retorno de aire.

- a. Cierto. Si le restamos la pérdida de  $100^{\circ}\text{F}$  durante el secado, tendríamos un retorno de  $160^{\circ}\text{F}$  y no requeriría un intercambiador.
- b. Falso. Si le restamos la pérdida de  $100^{\circ}\text{F}$  durante el secado, tendríamos un retorno a  $160^{\circ}\text{F}$  ( $>150^{\circ}\text{F}$ ) y sí requeriría un intercambiador.

9) Si la tolva secadora es muy pequeña, se recomienda aumentar la temperatura de secado por encima de la temperatura de secado recomendada.

- a. Cierto. Esto es una buena práctica.
- b. Falso. Esto es una práctica no recomendada.

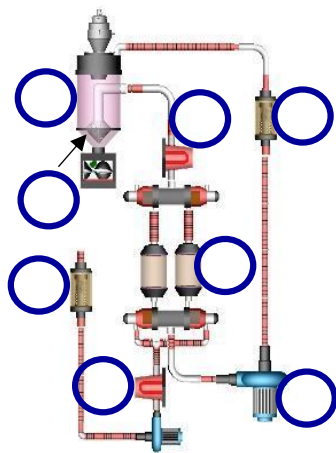
10) Bajo condiciones normales, la tolva secadora debe ser mantenida llena de material.

- a. Cierto.
- b. Falso.

- 11) Para determinar la necesidad de adquirir un intercambiador de calor en el retorno de la secadora, ¿cuánto le resta a la temperatura de secado?
- 100° F si la temperatura de secado es en grados Fahrenheit, y 56°C si la temperatura de secado es en grados Celsius.
  - 38° F.
  - 56° F si la temperatura de secado es en grados Fahrenheit, y 100°C si la temperatura de secado es en grados Celsius.
- 12) Para determinar el tamaño de la secadora se requiere saber:
- el flujo de aire seco, la temperatura de secado y la densidad granel de la resina plástica.
  - el consumo de material, el tiempo de secado y la densidad granel de la resina plástica.
  - el flujo de aire seco, la temperatura de retorno y el tamaño de la resistencia de calor.
- 13) Es de extrema importancia que se examinen los elementos filtrantes y se limpien:
- cada dos meses.
  - de acuerdo con las especificaciones de mantenimiento indicadas por el fabricante del equipo.
- 14) Un termoplástico higroscópico con una razón de flujo de 0.8 cfm/lb/h se debe secar en un proceso de 50 lb/h. Determine el flujo de la secadora.
- Flujo mínimo = 50 lb/h x 0.8 cfm/lb/h
  - Flujo mínimo = 50 cfm
  - Flujo mínimo = 50 litros por minuto

15) Escriba el número de cada descripción a su correspondiente lugar en el dibujo.

1. tolva de secado
2. difusor
3. bomba del circuito secado
4. filtro del circuito secado
5. recámaras secantes
6. resistencia de regeneración



## **Dosificación y Manejo de Materiales**

El mezclado y dosificación automático de resinas plásticas es una necesidad. Los elevados costos de las resinas, de los aditivos y la mano de obra hacen de la automatización una opción económicamente viable. Si a esto le suma las pérdidas a consecuencia del manejo manual, la inversión en la automatización podría tener un repago en menos de un año.

Algunas de estas deficiencias son:

- Exceso en dosificación manual de resina virgen y pigmento podría resultar en un exceso de 0.5%. Esto puede exceder el costo de un dosificador automático en un mes.
- El manejo de material premezclado manual incrementa los costos del almacenamiento.
- Pérdidas a consecuencia de la contaminación de resinas durante el mezclado manual.
- El manejo manual ocupa mayor espacio en el piso de producción.

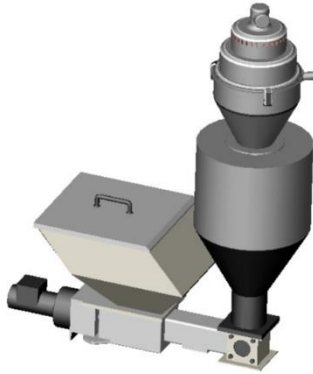
### **Tipos de dosificadores:**

- dosificación directa y volumétrica
- dosificación gravimétrica
- válvula proporcional neumática

#### **• Dosificación directa y volumétrica**

Este tipo de dosificación se efectúa en la garganta del barril. Los componentes de un dosificador son la tolva del ingrediente, el motor, y el tornillo dosificador. El diseño más popular es por medio de un tornillo sin fin (“Auger”). El tornillo rota dosificando la dosis directamente al flujo de resina. Esta dosificación es además conocida como dosificación volumétrica.

El dosificador se instala entre la tolva de resina y la garganta del extrusor. El flujo de la resina sin pigmentar baja por gravedad. La dosificación es una función de las revoluciones por minutos (rpm). La proporción de dosificación depende del tipo de ingrediente que se está agregando. Por ejemplo, la dosificación de pigmento granular fluctúa desde 0.25% a 6%.



#### *V-14. Dosificador*

Es importante adquirir el equipo del tamaño adecuado, por consiguiente, tenga a la mano:

- consumo total del proceso, en kg/h o en lb/h
- tipo de materiales
- proporción del aditivo
- tiempo de plastificación
- si fluyen con facilidad o se aglomeran

La dosificación continua es normalmente para extrusión y la dosificación periódica es para equipos de inyección. El de dosificación periódica alimenta únicamente durante la plastificación. Recuerde que la unidad de inyección toma material únicamente durante la etapa de plastificación; el resto del tiempo no está consumiendo material.

#### **Cálculo de consumo en dosificación periódica:**

Piense en una aplicación donde se desea pigmentar a una razón de 2.5% en un proceso de inyección. El peso de inyección total (piezas más colada) es de 0.12 kg y la plastificación (“recovery”) tiene una duración de 3 segundos. Recuerde que la dosificación sucede durante el periodo de plastificación.

Consumo de plastificación

$$\begin{aligned} &= (\text{Peso del tiro de inyección}) / (\text{Tiempo de plastificación}) \\ &= (0.12 \text{ kg}) / (3 \text{ segundos}) = 0.04 \text{ kg/s} = \mathbf{144 \text{ kg/h} \text{ (317 lb/h)}} \end{aligned}$$

Entonces el consumo de dosificación sería:

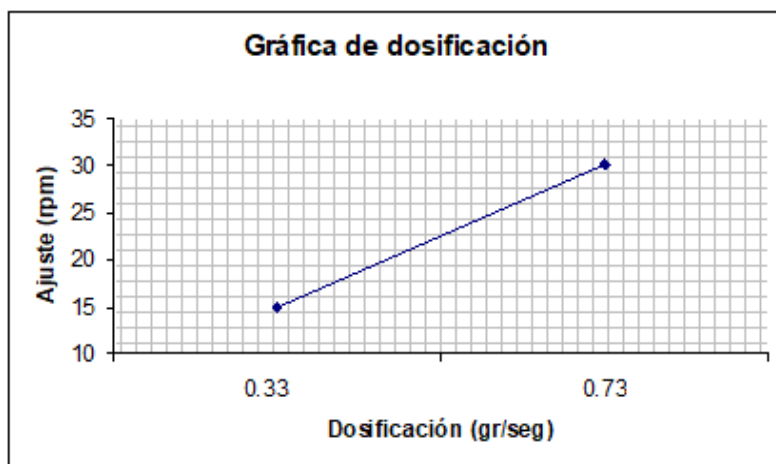
$$\begin{aligned} &= (\text{Consumo total}) \times (\text{Razón de dosificación}) \\ &= 144 \text{ kg/h} \times 0.025 \\ &= \mathbf{3.6 \text{ kg/h (7.9 lb/h)}} \end{aligned}$$

Aunque parezca simple, es común ver especificar un dosificador para inyección utilizando el tiempo del ciclo total, cuando debería utilizar el tiempo de dosificación.

Estos equipos proveen una toma de muestreo por donde se toman muestras a distintas velocidades de dosificación a un tiempo definido, luego se pesan y se calcula:

$$\text{Dosificación} = (\text{Peso de la muestra}) / (\text{Tiempo de dosificación})$$

Y se crea una gráfica de ajuste de velocidad contra dosificación.

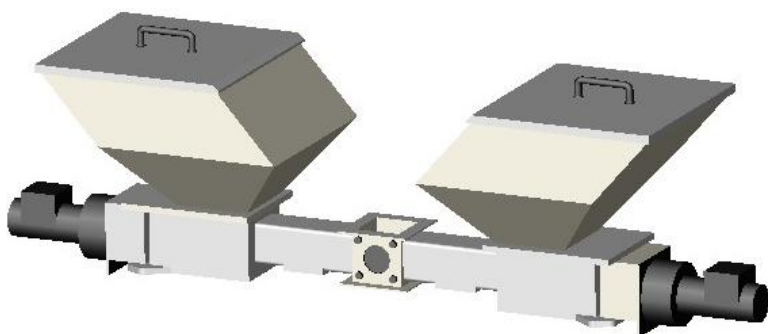


*V-15. Gráfica de ajuste vs. dosificación*

Esta gráfica se podría afectar con el tamaño y geometría del grano. Además, debe crear una tabla de calibración para cada pigmento.

Estos sistemas podrían tener una exactitud de hasta 0.2%. Ahora si desea mejor exactitud debería considerar los sistemas de mezclado y dosificado gravimétricos.

Si se desea dosificar más de un ingrediente pueden acomodar más de un dosificador en un mismo sistema; por ejemplo, uno para dosificar pigmento y el otro para dosificar material molido.



*V-16. Montura de dos dosificadores en un mismo sistema*

Ahora dosificación de tres o más aditivos es más visto con sistemas de dosificación gravimétricos.

Existen materiales que no fluyen con facilidad y necesitan ser manejados por equipos de dosificación especiales. Por ejemplo, un molido demasiado liviano podría requerir de un agitador para que facilite su fluidez. Consúltele a su suplidor de equipos o envíele muestra de su material si usted entiende que su material no fluye con facilidad.

- **Dosificación gravimétrica**

Estos sistemas se distinguen por su capacidad de poder pesar los ingredientes. Esto los hace más precisos y se consiguen con múltiples funciones, tales como: pesado de ingredientes, mezclado, recetas programables, control de inventario y dosificación de múltiples ingredientes.

Existen productos que requieren múltiples aditivos; estos pueden ser molido, reciclado, colorante, ablandadores, clarificadores, lubricantes, fibras, etc.

Un sistema gravimétrico se compone normalmente de las tolvas de material, el sistema de dosificación, la báscula de pesaje, el mezclador, y la descarga.



#### *V-17. Sistema gravimétrico*

Aunque su operación varía de acuerdo con el fabricante, conceptualmente funcionan de forma similar. Cada tolva está llena de un ingrediente, digamos virgen, molido, o pigmento granulado. Por medio de una guillotina o tornillo se alimenta sucesivamente los ingredientes a la báscula de pesaje. Una vez la proporción adecuada es pesada es descargada al mezclador. Después de ser agitados es descargado al tanque de descarga para luego ser procesado.

Para determinar el equipo adecuado se requiere saber el total de materiales, en kg/h o en lb/h, el tipo de materiales, la proporción de cada aditivo y si los materiales fluyen con facilidad o si se aglomeran.

Ejemplo, hay una aplicación donde se desea mezclar 3 ingredientes, virgen, molido y pigmento a una proporción de 77.5%, 20% y 2.5% respectivamente. Este proceso requiere 1 kg por minuto. El consumo total es de 1 kg/min = 60 kg/h (132 lb/h). Entonces el consumo de dosificación de cada ingrediente sería:

$$\text{Virgen} = 60 \text{ kg/h} \times 0.775 = \mathbf{46.5 \text{ kg/h (102.51 lb/h)}}$$

$$\text{Molido} = 60 \text{ kg/h} \times 0.2 = \mathbf{12 \text{ kg/h (26.46 lb/h)}}$$

$$\text{Pigmento} = 60 \text{ kg/h} \times 0.025 = \mathbf{1.5 \text{ kg/h (3.3 lb/h)}}$$



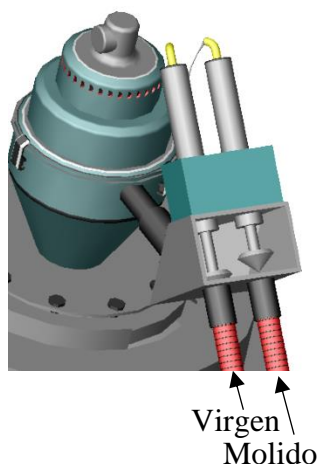
Estos cálculos no son necesariamente requeridos en los equipos modernos, con solamente proveer el porcentaje sería suficiente. Ahora si está adquiriendo un equipo nuevo los cálculos son necesarios para la configuración del equipo. Hable con el suplidor del equipo; ellos harán el cálculo por usted.

Repito, es importante que indique si el o los materiales no fluyen con facilidad. Consúltelo a su suplidor de equipos o envíele muestra de su material si usted entiende que su material no fluye con facilidad.

- **Válvula proporcional neumática**

El más simple de los mezcladores es la válvula proporcional neumática. Este se utiliza mayormente en el mezclado de virgen con molido y donde variaciones en proporción de hasta 5% son aceptables.

Este funciona por medio de válvulas con tapones de hule que controlan la succión de un material a la vez.



*V-18. Válvula proporcional neumática*

La válvula proporcional es montada en la tolva cargadora; mientras la tolva succiona material, la válvula controla el paso de los materiales proporcionalmente. Esto lo hace por medio de cilindros neumáticos que controlan la apertura de los tapones.

Por ejemplo, un mezclado de materiales A y B a una proporción de 30% y 70% respectivamente en una succionadora ajustada a que succione por 40 segundos. Los tiempos ajustados podrían ser:

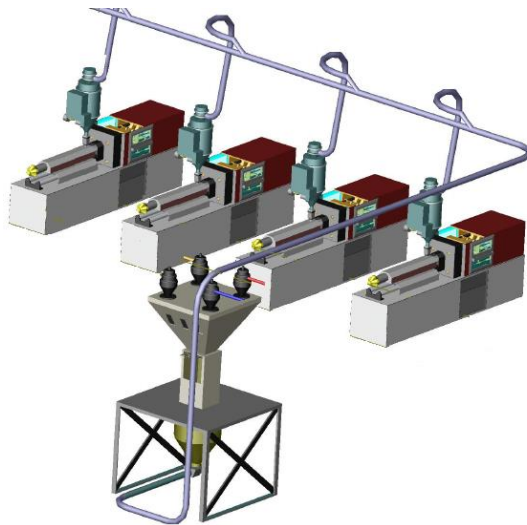
- Tiempo material A = **3 segundos**
- Tiempo material B = **7 segundos**

Ajustada adecuadamente esta crearía 8 capas alternadas entre material A y B.

Las ventajas de la válvula proporcional es que son económicas y fáciles de instalar. Su mayor desventaja es que no son proporcionalmente precisas. Por esto no es recomendado en mezclados donde la exactitud de la dosificación requerida sea menor de un 5%, como lo sería el caso de pigmento.

### **Centro de mezclado**

Este tipo de dosificado y mezclado se utiliza cuando el equipo es compartido con varios procesos. Antes de adquirir un sistema de mezclado automático consulte a un especialista diseñador de sistemas automáticos de mezclado y dosificación.



*V-19. Centro de mezclado*

## Preguntas

1) ¿Qué información se debe saber antes de adquirir un equipo dosificador de pigmento?

- a. color del pigmento, el correo electrónico del fabricante del pigmento y el consumo de material en kg/h
- b. consumo total del proceso (en kg/h o en lb/h), tipo de material, fluye con facilidad o se aglomera, proporción del aditivo y tipo de dosificación (continua o periódica)
- c. el costo del dosificador

2) En un proceso de inyección se desea pigmentar con una razón de 2%. El peso de inyección total (piezas más colada) es de 0.12 kg, la plastificación tiene una duración de 3 segundos, y el proceso produce piezas cada 18 segundos. Determine el consumo de dosificación.

- a. Consumo =  $(0.12 \text{ kg}/3\text{s}) \times 0.02$
- b. Consumo =  $(0.12 \text{ kg}/18\text{s}) \times 0.02$
- c. Deje que el proveedor del pigmento lo calcule por usted.

## Control de Temperatura de Agua al Molde

Es importante identificar las necesidades de su proceso y atender esas necesidades con soluciones bien pensadas, por esto:

- Antes de moldear, o hacer algún tipo de ajustes en la máquina de inyección, se deben efectuar algunos cálculos iniciales. A estos ajustes iniciales le llamamos “moldeo desde el escritorio”.
- Recuerde que está trabajando con equipos costosos; no apresure el trabajo.

En esta parte se hablará sobre el consumo de material, el calor removido, el flujo de agua, el tiempo de enfriamiento, y el control de temperaturas.

### Consumo de Material

Para determinar el consumo de material por un molde en particular se debería saber el ciclo aproximado del proceso de moldeo en segundos. La cantidad de material requerida por el molde en gramos o en la unidad de su preferencia.

La duración del ciclo de moldeo y el consumo de material la puede obtener del diseñador del producto o del fabricante del molde. El consumo de material se obtiene con:

$$\text{Consumo de material} = \frac{\text{Cantidad de material total}}{\text{Ciclo del proceso}}$$

Por ejemplo:

Con un molde que moldea componentes en policarbonato, el peso total requerido para llenar el molde es 275 gramos y el ciclo de moldeo esperado es 9 segundos.

$$\text{Consumo de material} = 275 \text{ gramos} / 9 \text{ segundos} = \mathbf{30.6 \text{ gr/s}}$$

Esto significa que este proceso consumirá cerca de 31 gramos/segundo (246 lb/h o 112 kg/h).

### Calor removido

El calor removido es la cantidad de calor removido por unidad de masa en un termoplástico en particular. Este se mide normalmente en unidades de BTU/h, kW y toneladas de enfriamiento, donde:

- $k_w = 3415.18 \text{ BTU/h}$
- Tonelada de enfriamiento por refrigeración = 12,000 BTU/h
- Tonelada de enfriamiento por torre = 15,000 BTU/h

$$\text{Calor removido} = \frac{\text{Cantidad de material total} \times \text{Energía requerida por el material}}{\text{Ciclo del proceso}}$$

Donde la cantidad de material que toma llenar el molde es en gramos, la energía requerida por el material es en julios/gramos y el ciclo del proceso es en segundos. La tabla a continuación muestra la energía requerida por ciertos materiales.

<b>Energía requerida por el material</b>		
Material	Energía requerida	
	julios/gramo	BTU/lb
PC	368	158
ABS	369	159
PS	394	169
LDPE	572	246
HDPE	801	344
PVC	434	187
PA66	615	264
PP	670	288
PET	283	122

V-20. *Tabla de energía requerida por algunos materiales*

Los valores provistos en esta tabla son una referencia; obtenga los valores reales de su suplidor de resina.

Ejemplo:

Un molde moldeando componentes en policarbonato, con un peso total requerido para llenar el molde de 275 gramos y con un ciclo esperado de 9 segundos. ¿Cuánto calor consumiría?

De la tabla anterior leemos que policarbonato precisa una energía de 368 julios/gr.

$$\text{Calor removido} = \frac{\text{Cantidad de material total} \times \text{Energía requerida por el material}}{\text{Ciclo del proceso}}$$

$$= \frac{(275 \text{ g}) \times (368 \text{ Julios/g})}{9 \text{ s}} = \mathbf{11244 \text{ J/s}}$$

$$= 11244 \text{ Watts} = 11.24 \text{ kW} = \mathbf{38400 \text{ BTU/h}}$$

Esto significa que para enfriar este molde necesitará consumir de su sistema de enfriamiento 11.24 kW o 38400 BTU/h.

Otro método utilizado es el uso de tablas provistas por los fabricantes de equipos de enfriamiento.

Material	kg/h/ton	lb/h/ton
HDPE	14	30
LDPE	16	35
PP	16	35
NILON/PA	18	40
PET	18	40
PS	23	50
ABS	23	50
PVC	30	65
PC	30	65
PETG	11.5	25

*V-21. Tabla termal para algunos materiales*

Este método es el más utilizado ya que es más simple y funciona.

Hagamos el ejemplo anterior donde un molde de componentes de policarbonato con un peso total de 275 gramos y un ciclo esperado de 9 segundos.

$$\text{Calor removido} = \frac{\text{Consumo de material}}{\text{Carga termal del material}}$$

De acuerdo con la tabla, el factor de energía de PC es 30 kg/h/ton o 65 lb/h/ton.

Consumo de material = Cantidad de material total / Ciclo del proceso

$$\begin{aligned} &= 275\text{g}/9\text{s} = \mathbf{30.6\text{ g/s}} \\ &= 110\text{ kg/h} = \mathbf{242\text{ lb/h}} \end{aligned}$$

$$\text{Calor removido} = \frac{\text{Consumo de material}}{\text{Carga termal del material}}$$

$$= \frac{110\text{ kg/hr}}{30\text{ kg/hr/ton}} = \mathbf{3.7\text{ ton de refrigeración}}$$

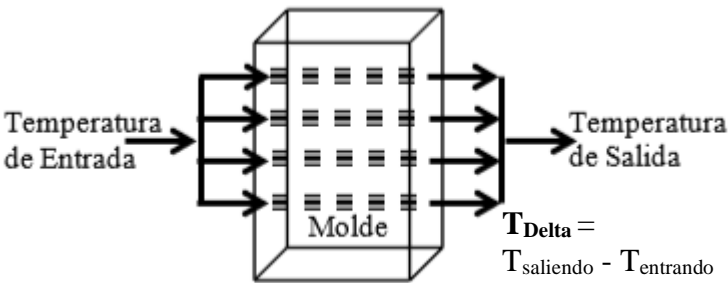
$$= \frac{242\text{ lbs/hr}}{65\text{ lbs/hr/ton}} = \mathbf{3.7\text{ ton de refrigeración}}$$

De acuerdo con estos cálculos el equipo de refrigeración (“chiller”) verá una carga de 3.7 toneladas.

Note que la carga obtenida en este ejemplo es algo distinta de la calculada en el ejemplo anterior. Son metodologías distintas, la primera se obtuvo de la academia y la segunda de ecuaciones empíricas desarrolladas por la industria. Utilice el método que prefiera, asegurándose de que las constantes provengan de fuentes confiables, como del fabricante de su resina.

**Flujo de agua**

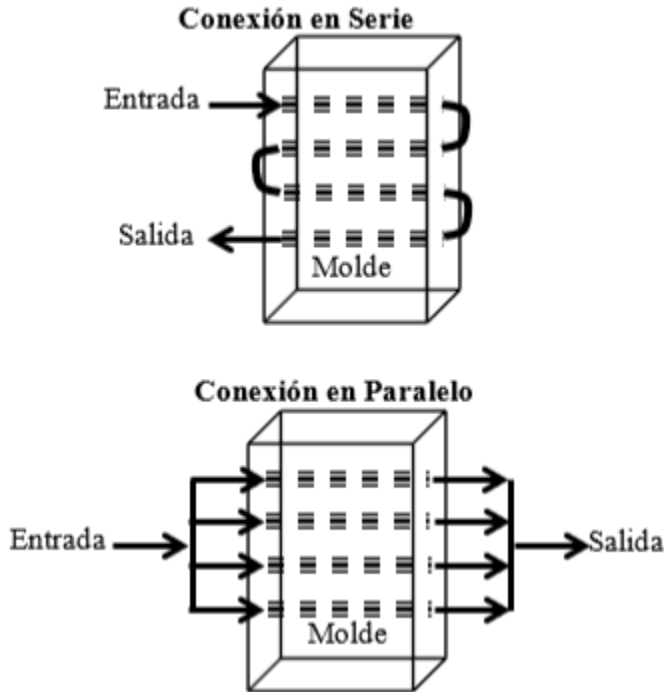
El flujo de agua por los pasajes del molde remueve el calor del material fundido dentro del molde. Consecuentemente el agua observará un incremento de temperatura; este incremento se le llama Delta T.



V-22. Flujo de agua por los pasajes del molde y Delta T

La conexión de las mangueras de agua al molde se hace en paralelo y no en serie. La conexión en serie no garantiza igual remoción de calor a través de todas las cavidades del molde.

En otras palabras, las cavidades al principio del flujo verán una remoción de calor distinta a las cavidades a la salida del agua. Aun cuando la conexión en serie sea más fácil, haga las conexiones en paralelo.



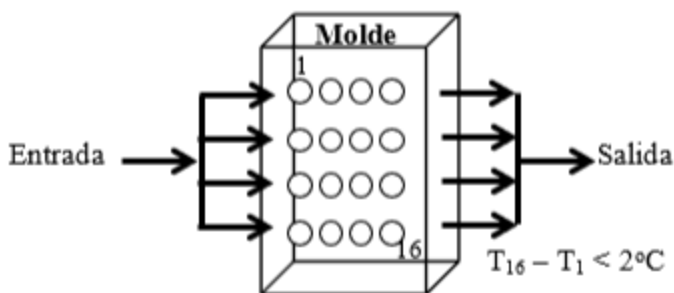
*V-23. Conexión de las mangueras de agua al molde en serie y en paralelo*

La conexión en paralelo garantizará:

- Uniforme remoción de calor y
- Uniforme distribución de temperatura en las cavidades

La temperatura entre las cavidades debe ser menor de 2°C (4°F).





#### V-24. Temperatura entre las cavidades

Consúltele al diseñador del molde cuál es el diferencial de temperatura entre cavidades más adecuado para su molde. Aclaremos, nos referimos a la temperatura del metal en las cavidades. Aunque el agua es quien hace el trabajo de remoción de calor, las temperaturas en el metal de las cavidades son las más significativas.

Otro efecto que debe saber es que el flujo de agua a través del molde debe ser turbulento y no laminar. El flujo turbulento es más eficiente removiendo calor que el laminar.

La turbulencia se consigue aumentando el caudal de agua entrando al molde. El caudal debe ser lo suficiente para garantizar un factor, llamado número Reynolds, que indica si el flujo es turbulento o es laminar. Este factor es función del flujo y de la geometría de los conductos.

Una simple manera de garantizar turbulencia es reduciendo el Delta T del agua a través del molde.

Por ejemplo:

- Procesos rápidos, menos de 10 segundos, Delta T ~  $1^{\circ}\text{C}$  ( $2^{\circ}\text{F}$ )
- Procesos lentos, mayores de 30 segundos, Delta T ~  $2^{\circ}\text{C}$  ( $4^{\circ}\text{F}$ )
- Procesos intermedios, Delta T ~  $1.7^{\circ}\text{C}$  ( $3^{\circ}\text{F}$ )

Consúltele al diseñador del molde cuál es el caudal (flujo de agua), la temperatura del agua, y el Delta T del agua más adecuado para su molde.

El flujo de agua lo determina con la siguiente ecuación:

$$\text{Flujo de Agua} = \frac{\text{Calor removido del plástico por ciclo}}{(\text{Calor específico del agua}) \times (\text{Delta T})}$$

El calor específico (Cp) podría ser el de simple agua, procesos extremadamente calientes podría ser el Cp de un aceite, y procesos muy fríos podría ser el Cp de una mezcla entre agua y anticongelante. Obtenga el valor de Cp que corresponda al líquido de transferencia de calor utilizado.

El calor específico del agua a 13°C (55°F) = **4.196 (kJ/(kg°C)) o 1.003BTU/(lb°F)**

Ejemplo: Un proceso consume 190 gramos de polipropileno cada 12 segundos. La temperatura del agua entrando al molde es 13°C (55°F) y dado a que es un ciclo promedio se asumió un Delta T de 1.7°C (3°F). ¿Cuál sería el consumo de calor y el flujo de agua requerido?

La energía requerida del PP es 670 J/gr, según la tabla de energía requerida por el material.

El calor específico del agua a 13°C (55°F) = 4.196 kJ/(kg °C)

Densidad del agua = 1kg/litro

$$\begin{aligned}\text{Calor removido} &= \\ \frac{\text{Cantidad de material total} \times \text{Energía requerida por el material}}{\text{Ciclo del proceso}} \\ &= \frac{190 \text{ gr} \times 670 \text{ J/gr}}{12 \text{ seg}} \\ &= 10608 \text{ J/s} = \mathbf{10.61 \text{ kJ/s}}\end{aligned}$$

Flujo de Agua:

$$Q = q / (C_p \times \text{Delta T}) = 10.61 \text{ kJ/s} / (4.196 \text{ kJ/(kg °C)} \times 2^{\circ}\text{C})$$

$$\begin{aligned}&= 1.264 \text{ kg/s} = 1.264 \text{ litros/s} = 75.85 \text{ litros/min} \\ &= \mathbf{20.1 \text{ gpm}}\end{aligned}$$

Este proceso requerirá un flujo de agua de 75.9 litros/min o 20.1 gpm.

Una forma simplificada de determinar el flujo del agua de *chiller* requerido por un proceso es con la ecuación empíricas:

$$\text{gpm} = \frac{24 \times (\text{Toneladas de Chiller})}{\text{Delta T}}$$

Para determinar el flujo de agua de torre requerido por un proceso:

$$\text{gpm} = \frac{30 \times (\text{Toneladas de Torre})}{\text{Delta T}}$$

Donde:

- gpm = Galones por minuto de agua
- Tonelada de *Chiller* = Toneladas de *chiller* requeridas para enfriar el molde
- Tonelada de Torre = Toneladas de torre requeridas para enfriar el molde
- Delta T = Temperatura saliendo del molde – Temperatura entrando (°F)

Seleccione el Delta T que más se ajusta a su aplicación:

- Procesos rápidos, menos de 10 segundos, Delta T ~1°C (2°F)
- Procesos lentos, mayores de 30 segundos, Delta T ~2°C (4°F)
- Procesos intermedios, Delta T ~ 1.7°C (3°F)

$$\text{Delta T (°F)} = 9/5 \times \text{Delta T (°C)}$$

En el ejemplo anterior, el proceso consume 190 gramos de polipropileno cada 12 segundos con un Delta T de 1.7°C (3°F). ¿Cuál sería el consumo de calor y el flujo agua requerido?

$$\begin{aligned} \text{Consumo de material} &= \\ \text{Cantidad de material total / Ciclo del proceso} &= 190\text{g}/12\text{s} = 15.8 \text{ g/s} = \mathbf{125 \text{ lb/h}} \end{aligned}$$

De la tabla antes mostrada, Carga Termal para Refrigeración, obtenemos que polipropileno (PP) demanda 35 lb/h/ton.

La carga en toneladas la obtenemos con:

$$\text{Calor por ciclo} = \frac{\text{Consumo de Material}}{\text{Carga Termal del Material}}$$

Sustituyendo, obtenemos:

$$\begin{aligned}\text{Calor requerido} &= (125 \text{ lb/h}) / (35 \text{ lb/h/ton}) \\ &= \mathbf{3.6 \text{ ton de chiller}}\end{aligned}$$

El flujo del agua de *chiller* requerido por un proceso se obtiene de la ecuación:

$$\begin{aligned}\text{gpm} &= \frac{24 \times (\text{Toneladas de Chiller})}{\text{Delta T}} \\ &= 24 \times (3.6 \text{ ton de chiller}) / (3^\circ\text{F}) = \mathbf{28.8 \text{ gpm}}\end{aligned}$$

De acuerdo a este método el *chiller* verá una carga de 28.8 gpm con un Delta T de 3°F. Una vez más el resultado obtenido es algo distinto al método anterior ya que esta ecuación es una aproximación empírica y las constantes provienen de fuentes distintas.

### Tiempo de Enfriamiento Estimado

El tiempo de enfriamiento es un parámetro de control Universal que puede afectar el resultado dimensional de las partes moldeadas y también puede afectar la etapa de plastificación. El tiempo de enfriamiento, por sí solo o combinado con la temperatura del molde, puede afectar las dimensiones térmicas del producto.

Determinar el tiempo de enfriamiento es un valor importante y se debe determinar antes de efectuar un laboratorio de optimización de proceso. Inicialmente el tiempo de enfriamiento es ajustado con un valor excesivo y se optimiza al final de un laboratorio de moldeo. Este se ajusta más grande de lo requerido para evitar que entorpezca la determinación de otros parámetros que se ajustan anteriormente.

Este valor extendido de tiempo de enfriamiento se puede obtener de una forma simple o calculada.

La forma simple es preguntándole al fabricante del molde o a alguien de confianza que ha moldeado con un molde similar. Tome el tiempo de enfriamiento recomendado y súmele un 30%.

$$\begin{aligned} & \text{Tiempo de enfriamiento extendido} \\ &= \text{Tiempo de enfriamiento recomendado} \times 1.3 \end{aligned}$$

El método calculado es por medio de la ecuación:

$$E = -\frac{G^2}{2\pi\alpha} \ln\left(\frac{\pi (T_x - T_m)}{4 (T_D - T_m)}\right)$$

El resultado de esta ecuación puede tener un 30% de error, aun así, para nuestro propósito resulta ser una buena herramienta.

$T_x$  = Temperatura de deflexión  
 $T_m$  = Temperatura de la cavidad  
 $T_D$  = Temperatura del derretido  
 $G$  = Grosor de la pieza  
 $\alpha$  = Difusividad térmica

Material	$\alpha$	T <sub>D</sub> (°F)	T <sub>M</sub> (°F)	T <sub>X</sub> (°F)
ABS	0.000185	475	135	203
CA, CAP	0.000181	400	110	192
CAB	0.0002	400	110	201
HIPS	0.000059	440	85	185
IONOM	0.000148	440	85	125
LDPE	0.000176	390	75	113
MDPE	0.000194	340	75	155
HDPE	0.000217	480	75	186
PA 6, 6/6	0.000109	530	150	356
PC	0.000132	560	180	280
PET	0.000138	540	120	153
PP	0.000077	470	105	204
PPO/PS	0.000144	530	185	234
PPS	0.000166	630	210	210
PS g.p.	0.000087	420	85	180
PSU	0.000149	700	250	345
PVC	0.000107	380	85	156
PVC rig	0.000123	380	85	174
SAN	0.000088	450	150	225

V-25. Tabla de constantes para ecuación de tiempos de enfriamiento

Dado a que el valor buscado debe ser mayor al valor calculado, le sumaremos un 40%.

$$\text{Tiempo de enfriamiento extendido} = E \times 1.4$$

### Control de Temperaturas (TCU)

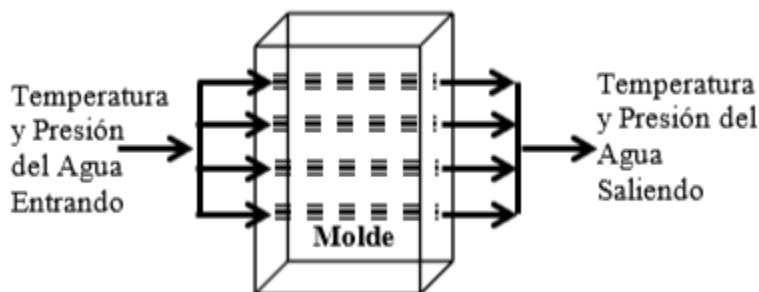
El controlador de temperatura (llamado TCU por sus siglas en inglés) es el responsable de mantener un flujo y una temperatura constante.

Durante el moldeo, la remoción de calor del molde es quien dicta las dimensiones térmicas. Recuerda, éstas son las dimensiones que son función del encogimiento. El flujo del agua al igual que la temperatura del agua son los factores que debemos controlar durante la remoción del calor.

Otros parámetros que debemos entender son la pérdida de presión (Delta P) y la pérdida de temperatura (Delta T) del agua.

$$\Delta P = \text{Presión del agua entrando} - \text{Presión del agua saliendo}$$

$$\Delta T = \text{Temperatura del agua saliendo} - \text{Temperatura del agua entrando}$$



V-26. Temperatura y presión del agua entrando y saliendo

Durante el proceso el Delta T y el Delta P se deben mantener. El cambio en estas podría conducir a variación en las dimensiones térmicas en las piezas moldeadas.

La variación en Delta T podría ser a consecuencia de:

- Pasajes sucios
- Cambios en el proceso
- Cambios en el flujo de agua
- Cambio en la temperatura del fundido

La variación en Delta P podría ser a consecuencia de:

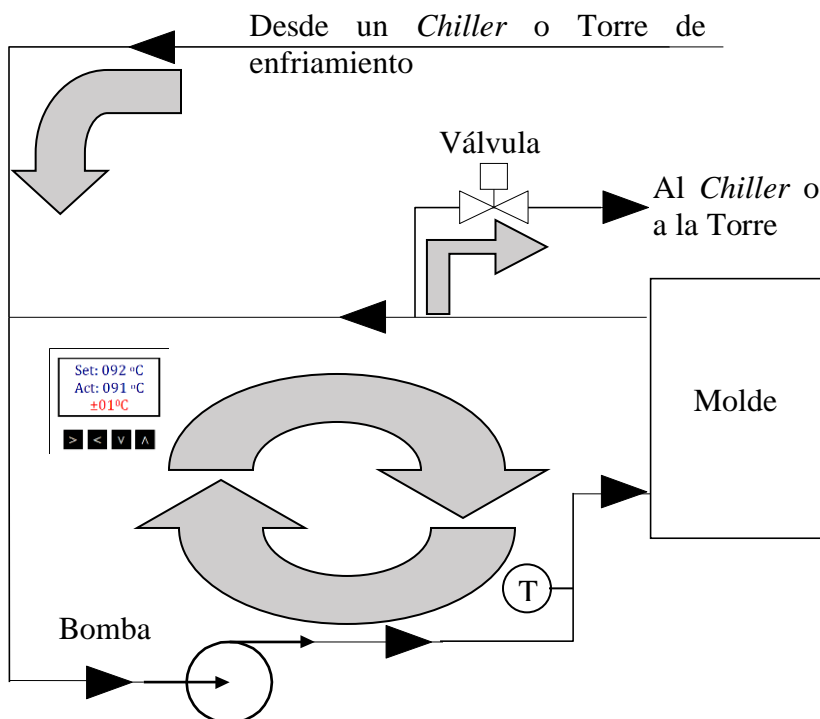
- Conductos sucios
- Conductos bloqueados por un objeto
- Conexión incorrecta
- Tubería de menor diámetro

### **TCU con enfriamiento directo**

Por medio de una bomba y una válvula se mantienen una temperatura y un flujo de agua constante. La fuente de enfriamiento proviene de un *chiller* o una torre de enfriamiento.

Los componentes principales son:

- Bomba: encargada de garantizar el flujo de agua a través del molde
- Toma de agua fría: permite que agua fría de *chiller* o torre entre al TCU
- Válvula de enfriamiento: esta descarga agua caliente desde el TCU al *chiller* o la torre
- Termopar: mide la temperatura del agua hacia el molde.
- Control: es el cerebro del TCU y controla parámetros como la temperatura del agua al molde.



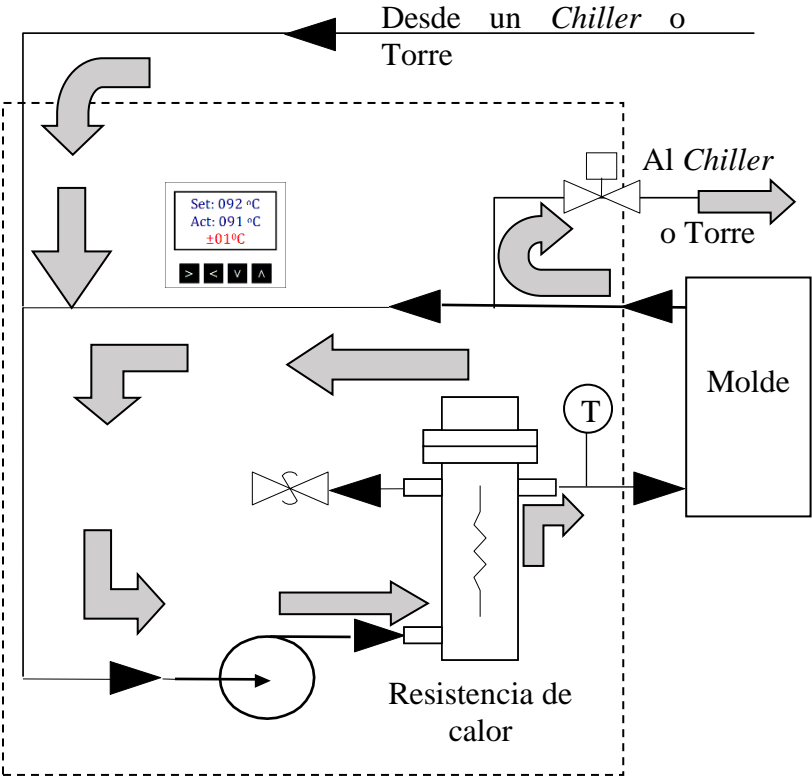
V-27. Diagrama de los componentes de enfriamiento directo

### TCU con enfriamiento y calentamiento directo

Esta unidad es similar al el TCU de enfriamiento directo. Por medio de una bomba, una válvula y una resistencia de calor se mantiene un flujo de agua constante y una temperatura constante. La fuente de enfriamiento proviene de un *chiller* o una torre de enfriamiento. Además, posee una resistencia de calor para asistir la incrementación de temperatura.



La mayor diferencia es que adicionan una resistencia de calor. La resistencia de calor únicamente enciende para asistir aumento de temperatura del agua efectivamente.



V-28. Diagrama de los componentes de enfriamiento y calentamiento directo

Veamos este funcionamiento con más detalle:

La bomba es la encargada de garantizar el flujo de agua entre el TCU y el molde. Cuando el control detecta que la temperatura hacia el molde quiere aumentar abre la válvula, permitiendo que esa agua caliente retorne al chiller o a la torre. Entonces, agua fresca entra al TCU por el lado de succión de la bomba. La resistencia de calor solo encendería para incrementar la temperatura del agua cuando el proceso así lo requiera.

Desde el punto de vista costo energético, la resistencia de calor aparenta ser ineficiente, pero no necesariamente. La resistencia solo enciende asistiendo el aumento de la temperatura del agua. Digamos que durante el

arranque de un molde se requiera incrementar 10°C, le tomaría bastante tiempo alcanzar ese incremento de temperatura si se dependiera de la fricción y el calor del molde. Otro escenario, durante la optimización de dimensiones térmicas, donde varias temperaturas del agua deben ser evaluadas para estudiar un efecto, habría que esperar demasiado entre cada incremento de temperatura.

Existen moldes que requieran ser conectados a más de un TCU. Esto podría ser para mejorar el desmolde de las partes, para corregir dobladuras, para garantizar alguna característica mecánica de la pieza moldeada como la formación de cristales en una parte del producto moldeado, etc.

Existen otros estilos de TCUs:

- *Flujo negativo* - Por medio de succión se consigue una presión de agua en el molde negativa, resolviendo problemas de filtración.
- *Circuito cerrado* - Este separa el agua de molde del agua de proceso, con el objetivo de minimizar depósitos de contaminantes y minerales en el molde.
- *Por aceite* - El fluido de transferencia son aceites que permiten rangos de temperatura altos, 120°C a 290°C (~250°F a 550°F).
- *Chiller y TCU integrados* - Este no necesita de una fuente de enfriamiento externa.

Cada proveedor de TCU ofrece múltiples opciones. Considere:

- La purga de agua de moldes, dispositivo que le permite vaciar el agua del molde, evitando el derrame de agua durante el cambio de moldes.
- Dispositivos de protección, como alarmas programables de presión y temperatura.
- Alarmas preajustadas por el fabricante, como temperatura máxima operacional del sistema y presión mínima permitida de su fuente de enfriamiento, *chiller* o torre. Estas alarmas son principalmente para proteger el equipo.

Es importante no deshabilitar esas alarmas incluidas por el fabricante. Por ejemplo, la alarma de presión mínima del agua que proviene de la fuente de enfriamiento, típicamente preajustada a sobre un 1 bar, impide que la bomba se dañe a consecuencia de cavitación.

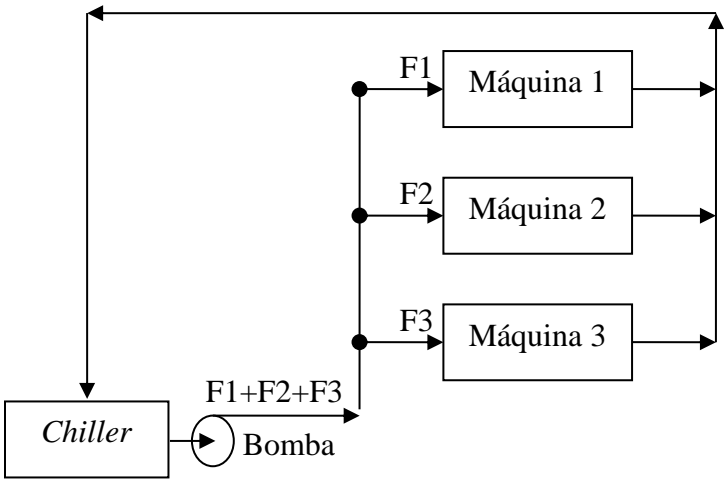
También importante: la fuente de enfriamiento, *chiller* o torre, debe estar por lo menos 5°C (10 °F) más fría que la temperatura que usted desea ajustar en el TCU. Esto se hace para compensar por las pérdidas de calor a consecuencia de la fricción y el calor que proviene del molde. De lo contrario es probable que no logre bajar a la temperatura ajustada.

Si la torre de enfriamiento provee agua a 30°C, conecte los TCUs que requieran operar a 35°C o más. Todo molde que requiera menos de 35°C se debe conectar al *chiller*.

Un significativo beneficio de los TCUs es que, independientemente de lo que suceda en el resto de la fábrica, la bomba garantiza un flujo constante entre el TCU y el molde. En otras palabras, si el TCU no existiera y el enfriamiento fuese directo desde un *chiller* centralizado, o compartido con otros procesos, el molde estaría sujeto a lo que suceda en esa tubería de agua compartida.

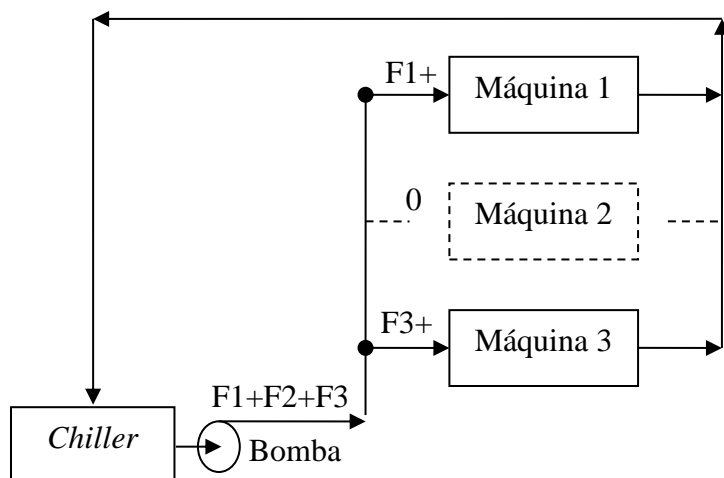
Por ejemplo, tres máquinas con moldes similares que comparten un *chiller*. Bajo una operación ideal el flujo de agua de *chiller* es compartido entre las tres máquinas.

.



V-29. Tres máquinas compartiendo un chiller

En el evento de que una de las máquinas se detenga para mantenimiento del molde, el flujo que agua de *chiller* que antes llegaba a ese molde será compartido con los otros dos moldes.



V-30. Tres máquinas compartiendo un chiller, con una máquina detenida

Consecuentemente podría afectar las dimensiones térmicas de las piezas moldeadas. De igual manera sucede un lunes cuando todas las máquinas se arrancan después de haber estado todas detenidas. Según se van encendiendo las máquinas se afectarán las que ya están en operación. Un escenario bastante complicado.

### Resumen:

- Parte del calor transmitido al agua, circulando entre el TCU y el molde, proviene de la fricción.
- Las conexiones de las mangueras deben ser en paralelo.
- El flujo de agua debe ser turbulento.
- El Delta T del agua debe ser menor de  $2^{\circ}\text{C}$  ( $4^{\circ}\text{F}$ ).
- La temperatura del metal de las cavidades debe ser uniforme, menor de  $2^{\circ}\text{C}$  ( $4^{\circ}\text{F}$ ).
- La pérdida de presión a través del molde se debe mantener.
- La pérdida de temperatura a través del molde se debe mantener.
- En sistemas centralizados el TCU independiza el flujo de agua al molde.
- La fuente de enfriamiento, *chiller* o torre, debe estar por lo menos  $5^{\circ}\text{C}$  ( $10^{\circ}\text{F}$ ) más fría que la temperatura ajustada en el TCU.

## Preguntas

1) Un molde requiere agua a una temperatura de 32°C, el *chiller* provee agua a 12°C (~55°F) y la torre a 30°F (~85°F). ¿Dónde conecta el TCU?

- a. A la torre, porque el agua de torre debe estar por lo menos 1°C más frío que la temperatura deseada.
- b. Al *chiller*, ya que el agua de la torre está a solo 2°C más frío y no a 27 °C (32 °C – 5°C) según es requerido.

2) Para PA (nilón), ¿cuántas toneladas de enfriamiento se necesitan para un consumo de 40 lb/h?

- a. 2 toneladas de enfriamiento
- b. 1 tonelada de enfriamiento
- c. ½ tonelada de enfriamiento

3) Un molde que moldea componentes en nilón consume 275 gramos por ciclo, y el ciclo esperado es 9 segundos. ¿Cuánto es el consumo por hora?

- a. Consumo de material = 275 g/h
- b. Consumo de material =  $(275/9) = 39 \text{ lb/h}$
- c. Consumo de material =  $(275\text{g}/9\text{s}) \times (3600 \text{ s/h}) \times (\text{kg}/1000\text{g}) = 110 \text{ kg/h}$

4) Las conexiones del distribuidor (“manifold”) al molde se hacen:

- a. en paralelo, y las mangueras son del mismo diámetro de las conexiones del molde.
- b. en serie, y las mangueras son de un diámetro menor que las conexiones del molde.

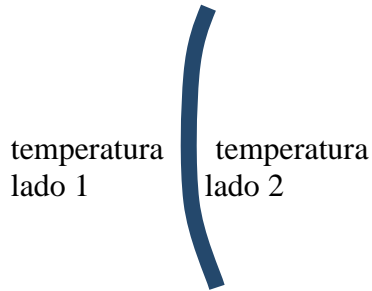
5) La temperatura del molde es igual a la temperatura del agua.

- a. Cierto. La temperatura del metal es algo más fría.
- b. Falso. La temperatura del agua y la del metal suelen ser distintas.

6) Un proceso con polipropileno (PP) demanda 3.6 toneladas de *chiller* a un Delta T de 2°C (4°F). ¿Qué flujo de agua de *chiller* necesitaría?

- a.  $= 24 \times (3.6 \text{ ton de } \textit{chiller})/(4^\circ\text{F})$
- b.  $= 30 \times (3.6 \text{ ton de } \textit{chiller})/(4^\circ\text{F})$
- c.  $= 24 \times (3.6 \text{ ton de } \textit{chiller})/(2^\circ\text{C})$

7) Una pieza se dobla después de desmoldada. Se sabe que con temperaturas distintas de caras del molde se elimina el doblado.



La solución es:

- a. poner la temperatura del lado 1 mayor al lado 2.
- b. poner la temperatura del lado 2 mayor al lado 1.
- c. poner ambas temperaturas iguales.