

Mejora de la Eficiencia de una Extrusora de Doble Tornillo Utilizada en la Fabricación de Tuberías de PVC

J. Suéscum, C. Correa, A. Rigail-Cedeño*

Área de Materiales y Procesos de Transformación / Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Km. 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil – Ecuador

* arigail@espol.edu.ec

Resumen

La eficiencia de una extrusora es de gran importancia en el momento de determinar los costos de un producto en una industria transformadora de plásticos. Esta investigación se enfoca en la optimización del proceso de extrusión de doble tornillo para fabricar tubos de PVC con la finalidad de disminuir los gastos por desechos y fallas de calidad. Se describe el proceso de extrusión, considerando la composición del compuesto de PVC, el diseño del molde y calibradores. Se logró identificar limitantes en el rendimiento, causados por rugosidad interna y externa en la tubería, altas contrapresiones sobre el tornillo, hinchamiento de la manga al salir del cabezal y falta de enfriamiento en los tornillos. Adicionalmente, se utilizó una matriz de identificación y evaluación de aspectos ambientales con el propósito de priorizar las limitantes con mayor incidencia en el rendimiento de la máquina. Analizadas las limitantes, se establecieron las siguientes soluciones: modificar las características lubricantes del compuesto, cambiar el diseño del molde, controlar la temperatura de los tornillos, e incrementar el enfriamiento a la entrada del calibrador. El mejoramiento del proceso de extrusión incrementó la producción de tubería, produjo reducción en el consumo energético y en la generación de desperdicios.

Palabras Claves: *doble tornillo, extrusión, PVC, tubería, eficiencia.*

Abstract

The extruder efficiency has great importance in a plastic factory, establishing the cost of manufactured products. In this work, we have focused on the twin screw extruder optimization with the main objective to decrease the costs generated by scrap and quality problems. The extrusion process was described, considering the PVC compound, die and calibrator designs. The output constraints were identified, which are caused by internal and external pipe roughness, high counter pressure over the screws, high pipe swelling after the die and screw cooling. Additionally, an identifying matrix was used to evaluate the environmental aspects with the purpose to establish the most important output constraint with the most incidences in the process. When these were analyzed, the following solutions were established: to modify the lubricant characteristics of the PVC compound, to change die design, to control the screw temperature, and to increase cooling at the calibrator entrance. The application of these controls increased the extruder output, reduced energy consumption and scrap generation.

Keywords: *double screw, extrusion, PVC, pipe, efficiency.*

1. Introducción

Las actuales exigencias del mercado en la fabricación de productos requieren que se cumplan reducidos tiempos de producción, entrega, y calidad continua de los productos manufacturados. El objetivo principal de este estudio es obtener la mayor productividad posible de una extrusora de doble tornillo considerando la generación de desechos, energía y calidad. No se consideran errores de

Para este estudio se realizaron pruebas continuas en la máquina y se definieron las prioridades de solución. Es necesario considerar que la aplicación de estas soluciones son válidas únicamente para la máquina extrusora utilizada en este estudio. Sin embargo, se pueden aplicar métodos similares a los presentados en este trabajo para encontrar la solución en otras máquinas.

Este estudio establece una relación entre el procesamiento de una tubería de PVC y la gestión ambiental relacionada con el proceso, la cual es de alta relevancia para la industria procesadora de plásticos y puede tener mucha utilidad para el procesamiento de otros polímeros. Aspectos sobre formulaciones químicas y procesamiento de tubería PVC utilizados en este estudio pueden ser encontrados en referencias bibliográficas [3] [4] [5].

2. Aspectos ambientales del proceso de Extrusión

Dentro del proceso de extrusión, los aspectos ambientales son las interacciones que tiene el sistema de extrusión con la naturaleza o medio. En esta investigación se priorizan los siguientes aspectos ambientales: generación de scrap en diferentes etapas del proceso y desperdicio de energía eléctrica al mantener bajos rendimientos. Se utilizó una matriz como herramienta de identificación y evaluación de aspectos ambientales, considerando el punto de vista de la calidad, para la priorización de los problemas presentes en el proceso.

3. Limitaciones del Rendimiento de una máquina

Existen muchos factores que pueden generar un producto de mala calidad o una limitante en el rendimiento de la máquina, como lo son: el compuesto de PVC, el diseño de los moldes, la capacidad de la tina de enfriamiento, el diseño de los calibradores, la

operación, fallas eléctricas, fallas mecánicas y cortes de energía.

En el caso de una extrusora de doble tornillo existen diferentes motivos por los que la máquina tiene limitado su potencial rendimiento. Dentro de las principales causas encontramos: la elaboración del compuesto [1] [3], el diseño del cabezal [3], los calibradores [2] y diseño o condiciones de los tornillos [3].

sincronía de la máquina con la jaladora o sierra, el funcionamiento de las bandas de calentamiento, la contrapresión generada por el molde sobre los tornillos, entre otros. En este trabajo nos enfocamos en las limitantes del rendimiento de la máquina desde el punto de vista del compuesto, del molde y del calibrador.

3.1 Limitante en el compuesto

El limitante se debió a que el compuesto de PVC no fluía con facilidad a través del molde y el producto presentaba rugosidad al salir del molde o dado. Esta rugosidad se apreciaba en el interior del tubo ya que la rugosidad exterior disminuye considerablemente al pasar por el calibrador. En ocasiones se observó que la tubería presentaba una raya amarillenta continua a lo largo de la tubería, esto es un indicativo de degradación térmica del material durante el procesamiento. Por otro lado, el efecto de la rugosidad sobre el flujo de plástico fundido produce una contrapresión elevada por la restricción que se genera en el material. Para evitar estos defectos, se dosificó un lubricante externo para disminuir la fricción con las paredes internas del molde y por tanto, disminuir la contrapresión para incrementar la producción de la máquina.

3.2 Limitante en el molde

El presente trabajo se realizó en una máquina con un formador anular de patas de araña, que es el dispositivo encargado de dar la forma de tubería al flujo de plástico fundido. Para realizar esta labor, se requieren altas presiones para obtener una fusión adecuada del plastificado. Esto ocasiona una gran contrapresión que cual limita de gran manera la producción neta de la máquina.

3.3 Limitante en el calibrador

El sobrecalentamiento del calibrador. Cuando la tubería deja el cabezal con una alta temperatura, el calibrador se recalienta demasiado en su entrada y por tanto el material tiende a apilarse, causando un defecto

visual en la tubería. Para evitar esto, se estiró el material a su entrada al calibrador, aunque con esto pueden generarse problemas en los ensayos de reversión.

4. Priorización de las limitantes

Para priorizar las limitantes en el rendimiento de una máquina se utilizó un método de evaluación considerando la severidad de contaminación, la probabilidad de ocurrencia, su relación con la legislación local y su cumplimiento con respecto a las normas de calidad. El método propuesto de evaluación consiste en el resultado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Resultado} = [(\text{severidad} \times \text{probabilidad}) + \text{criterio de calidad}] \times \text{cumplimiento legal.} \quad (1)$$

Los valores para la severidad, probabilidad, criterio de calidad y cumplimiento legal se definen según la Tabla 1 y Tabla 2.

Con la información proporcionada, se procede a definir la importancia del aspecto ambiental de acuerdo al resultado obtenido, por lo que se han definido rangos para definir su significancia:

- Trivial = 0 a 4.
- Moderado = 4 a 8.
- Importante = 8 a 12.
- Significativo = mayor a 12.

Tabla 1. Grados de severidad y probabilidad.

Grado	Severidad	Probabilidad
1	Si no provoca grandes problemas en el rendimiento de la máquina, y pocos desperdicios de insumos o generación de desechos	Si su ocurrencia es aleatoria y poco frecuente (menor a una vez por programa de producción).
2	Si provoca parada de la máquina, generación de desechos excesiva, desperdicio de insumos.	Si el problema persiste e influye en el rendimiento de la máquina en un 50%
3	Si provoca generación continua de desperdicios, exceso consumo de materia prima, etc.	Si el problema se presenta siempre que hay un nuevo programa de producción de la máquina.

Tabla 2. Grados de cumplimiento legal y del criterio de calidad.

Grado	Cumplimiento Legal	Criterio de Calidad
1	Se mantiene un 100% del cumplimiento legal en base al proceso identificado.	Se mantiene un 100% del cumplimiento de acuerdo a las normas (INEN).
2	Se cumple la ley, pero está cerca del límite de cumplimiento.	No se cumple con uno de los parámetros de cumplimiento, pero se encuentra dentro del 10% del límite.
3	No se cumple con lo establecido en la ley.	La diferencia de cumplimiento se encuentra por encima del 10% mencionado anteriormente.

Mediante el uso de esta metodología en la evaluación de aspectos ambientales identificados, se estableció como significativo lo siguiente:

- Generación de desechos no aprovechables – al existir poco lubricante en el interior del túnel (material quemado); por lo que se debe tomar atención especial a la formulación.
- Generación de Scrap – al obtener fallas por alto hinchamiento o contrapresión en el molde; se observa que hay restricción de flujo y dificultades en el molde para controlar la memoria del plástico.

Considerando estos resultados, se realizaron gestiones para su solución.

4. Soluciones propuestas

4.1 Cambios en la formulación del compuesto

Luego de realizar varias pruebas del material en la máquina, se produjeron desperdicios debido a la falta de fluidez del material en el molde. Al desarmarlo, se observó que el material se encontraba pegado dentro de las paredes del mismo. También se observó que este problema puede ser causado por falta de temperatura al final del túnel y tornillo ya que, es en el área en que se generan las altas fricciones del material.

Inicialmente se agregó un ingrediente adicional al compuesto de PVC, el cual tiene la característica de ser un lubricante externo. Como todas las pruebas son realizadas en línea, inmediatamente pudimos evidenciar un incremento del 20% en el rendimiento,

eliminando la causa raíz del problema. Al realizar esto se evidenció otra limitante, la rugosidad interna de la tubería, esto era por mantener altas temperaturas en el compuesto, por lo que se debe disminuir la fricción interna del material (entre el túnel y el tornillo). Se variaron los porcentajes de cera parafinica. Sin embargo, no se obtuvieron incrementos en el rendimiento de la máquina luego de esta variación, por lo que se optó en realizar cambios en el proceso, tal como se describirá adelante.

Tabla 3. Formula del compuesto PVC utilizada.

Ingredientes	Concentración (phr)
Resina de PVC	100
Ayuda de proceso	0.75
Modificador de impacto	5.00
Estabilizante	1.00
Esterato de Calcio	1.00
Ceras	0.70
Cera polietilénica parcialmente oxidada	0.45
Dióxido de Titanio	10.00
Carbonato de calcio	2.00
Cera polietilénica	1.00

4.2 Modificaciones al diseño inicial del molde

Una limitante del rendimiento, es la unión de la brecha que se genera por las patas de araña; como una alternativa se requiere de un tiempo de relajación para la homogenización de la mezcla. En esto juega un papel muy importante el diseño del molde. Adicional a esto, al mismo tiempo se genera el problema de un alto hinchamiento de la manga al salir del cabezal ocasionado por mal diseño del molde al no considerar el efecto de la memoria del polímero.

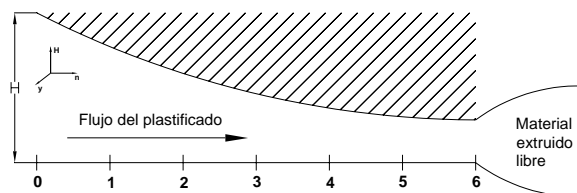


Figura No.1 1. Sección interna de un molde.

Para realizar las modificaciones, se emplearon una serie de ecuaciones que involucran al esfuerzo interno del material, su deformación, las medidas del molde y el tiempo que el material permanece dentro del molde. Estas ecuaciones se muestran a continuación:

$$\sigma(n+1) = \sigma(n) + \Delta\sigma(n) - \sigma(n) \cdot \frac{\Delta t(n)}{\tau(n)}, \quad (2)$$

$$\Delta\sigma(n) = E \cdot \delta, \quad (3)$$

$$\delta = \frac{H(n) - H(n+1)}{H(n)}, \quad (4)$$

$$\tau(n) = \tau_0 \cdot e^{-\sigma(n)}, \quad (5)$$

$$\Delta t(n) = \frac{H(n) \cdot \Delta y}{\dot{V}}, \quad (6)$$

Donde σ es el esfuerzo, n el punto a lo largo del molde en donde se obtienen los datos, t el tiempo local de residencia del compuesto, τ el tiempo local de relajación, τ_0 el tiempo de relajación en $n = 0$, E el módulo de elasticidad cuando el compuesto se encuentra caliente, δ la deformación del material, y la distancia en un eje, tal como se indica en la figura 1, V es el flujo volumétrico por unidad de longitud en la dirección y .

Con los datos de las medidas del molde, el tiempo de relajación y el módulo de elasticidad, y utilizando las ecuaciones previamente expuestas se obtuvieron los datos aproximados del hinchamiento del material y de esta manera modificar la salida del molde. Por esto se decidió disminuir 2 mm de la nariz para disminuir la contrapresión generada por el molde y el hinchamiento causado por las altas temperaturas, y por tanto aumentando el rendimiento. Se descartó como solución el incremento de la longitud del molde para reducir la memoria del plastificado ya que de acuerdo a los cálculos realizados, la reducción de hinchamiento no era significativa, para definir esto se aplicaron la siguiente fórmula:

$$EL = H + \delta * H \quad (7)$$

Donde, EL es el espesor del producto al salir del molde.

4.3 Modificación de los calibradores

Se realizaron algunas modificaciones en el molde para disminuir los problemas por el material hinchado. Sin embargo, para minimizar esta restricción, también se colocaron calibradores con menor espesor de pared para mejorar la conducción térmica en el mismo y enfriar la tubería rápidamente y disminuir el hinchamiento de la misma.

4.4 Cambios en el proceso

Luego de realizar todos estos cambios, y habiendo incrementado los rendimientos, se analizó el problema de la rugosidad interna en la tubería; se estudió el caso y se concluyó que el problema era la temperatura generada por la fricción entre la pared interna del molde y la nariz. En primera instancia se pensó que era el material, sin embargo se encontró que era un problema de enfriamiento de los tornillos. A diferencia de otras máquinas, ésta no tiene enfriamiento por aceite, sino que tiene una cámara interna con agua dentro del tornillo. El enfriamiento se explica en el siguiente diagrama:

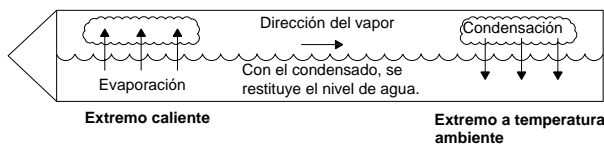


Figura 2. Sistema de enfriamiento del tornillo

Al retirar el agua de los tornillos luego de sacarlos de la máquina, evidenciamos que estaban 95% llenos de su capacidad total. Esto ocasionaba que en el extremo del tornillo (cerca al cabezal) se calentara a causa de la fricción y no permitiera el ciclo como se muestra en a Figura 2. La Figura 3 muestra un diagrama del problema de enfriamiento mencionado:

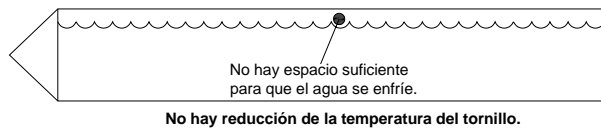


Figura 3. Calentamiento del tornillo

5. Análisis de las soluciones propuestas y resultados

5.1 Análisis de las soluciones

En el diagrama descrito en la Figura 4 se describen los problemas (cuadros blancos) y soluciones propuestas (cuadros azules) de los numerales anteriores.

5.2 Comparación de los resultados obtenidos

Los resultados obtenidos son satisfactorios con respecto al incremento de rendimiento y al ahorro en el consumo de energía eléctrica, disminuyendo el desperdicio.

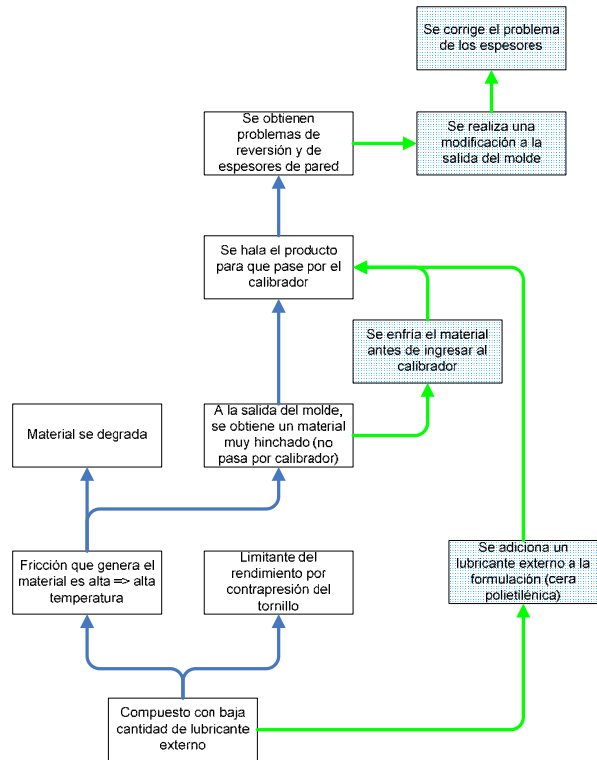


Figura 4. Análisis de causa

Las fechas utilizadas en las tablas siguientes coinciden con las condiciones de la máquina antes y después de realizar las modificaciones.

Tabla 4. Comparación de rendimientos.

Descripción	Fecha de las pruebas	
	13.01.2006	23.08.2006
Rendimiento	475 k/h	650 k/h
Temperatura del material	195 °C	194 °C
Contrapresión	170 bar	175 bar
Reversión	5.65 / 5.70 %	2.75 / 2.73 %

Tabla 5. Comparación de consumo energético.

Descripción	Fecha de las pruebas	
	13.01.2006	23.08.2006
Consumo energético (kw-h)	4.153	3.060
Costo (USD)	248,18	183.60

5. Conclusiones

Para nuestro caso las fallas en la elaboración de tubería de PVC se enfocaron en la zona del cabezal y en la formulación del compuesto.

Se determinó que el hinchamiento del producto estaba relacionado con el diseño del molde. Los problemas de rendimiento se relacionaron principalmente con el espesor de pared y los problemas de reversión. Se incrementó la contrapresión sobre los cojinetes de los tornillos al incrementar la alimentación de material a la máquina luego de la mejora en la productividad; esto provoca una limitante en la velocidad del tornillo que está dada en función de la intensidad máxima que puede tomar el motor.

Mediante la aplicación de los controles discutidos en esta investigación, se pueden evitar impactos ambientales significativos. Se disminuyen la cantidad de desechos que se genera por malformaciones en el producto final, se tendrá un consumo óptimo de energía eléctrica, se mantienen altos rendimientos de la extrusora, se mejora la eficiencia en el uso del motor al no sobrecargarlo y se ahorra en el consumo de materia prima por disminución en el sobrepeso de la tubería. Se aumentó la calidad generando menos desperdicios

Para optimizar el rendimiento en una extrusora se deben observar ciertos puntos críticos, tales como la temperatura de la mezcla, la contrapresión sobre los tornillos y homogenización de la mezcla. Para controlar estos lugares críticos es importante revisar la formulación, fluidez del material, diseño del molde, enfriamiento y diseño de los tornillos.

6. Agradecimientos

Se agradece de manera especial a la compañía AMANCO-PLASTIGAMA por el apoyo a la realización de este estudio en todas sus fases.

7. Referencias

- [1] Rao Natti, Reducing resin waste by optimizing polymer process and machine design. Proceedings ANTEC 2006 Society of Plastics Engineering (SPE)
- [2] Carneiro O y Nobrega J, Improving the efficiency of the calibration stage in the production of extruded profiles ANTEC 2006 Society of Plastics Engineering (SPE)
- [3] Potente H. Fundamental Mechanism in Polymer Processing, ANTEC 1998 Society of Plastics Engineering (SPE)
- [4] A. Brent Strong, *Plastics: Materials and Processing* (2nd. Edition, Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall, 2000), pp. 25-65, 211-216.
- [5] N. G. McCrum, C. P. Buckley, C.B. Bucknall, *Principles of Polymer Engineering* (First Edition, New York, Oxford University Press, 1988), pp. 101-159.
- [6] John J. Aklonis, William J. MacKnight, *Introduction to Polymer Viscoelasticity* (Second Edition, Canada, Jhon Wiley & Sons, Inc, 1983) pp, 139-156.
- [7] B. Vergmes & J. S. Agassant, "Die flow computation: A method to solve industrial problems in Polymer Processing", *Advance in Polymer Technology* (Centre de Mise en Forme des Materioux), Vol. 6, No. 4 (1986), pp. 441 – 455.
- [8] George E. Mase, PhD, *Shaum's outline of theory and problems of continuum mechanics* (New York, Mc Graw Hill Book Company, 1970), pp. 196 – 206.
- [9] Martin Grohman & Scott Holloway, *Successful extrusion of small diameter CPVC pipe* (Cincinnati, Ohio, Cincinnati Milacron, 1996).
- [10] H. Overeijnder, *Why is the compression ratio hended in a PVC Die-head?* (Dedemsvaart, The Netherlands, Wavin Research and Development, Rollepaal 20, may 14, 1982).