

METODOLOGÍA PROPUESTA PARA DISEÑO DE DISTRIBUIDORES DE EXTRUSIÓN DE CABLE

Carlomagno Rivas Plaza, Eduardo Pérez Pantoja, Armando Gallegos Muñoz, Eduardo Aguilera Gómez
Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica y Electrónica, Universidad de Guanajuato
Carretera Salamanca-Valle de Santiago km. 3.5 + 1.8km. Comunidad de Palo Blanco, Gto.
Teléfono: (464) 6479940

carlomagno@prodigy.net.mx, pantoja@salamanca.ugto.mx, eag@salamanca.ugto.mx,
gallegos@salamanca.ugto.mx

RESUMEN

En México, el proceso de extrusión de cable eléctrico se lleva cabo usando generalmente maquinaria importada. Uno de los principales componentes de esta maquinaria es el cabezal, y dentro del mismo, el distribuidor. El distribuidor es el responsable de recubrir uniformemente al alambre con polímero para producir el cable eléctrico. La inadecuada uniformidad de polímero conducirá a pérdidas económicas a la compañía productora de cable eléctrico, así como también un impacto en el aislamiento del cable. Existen en la industria diferentes tipos de distribuidores comerciales. Este estudio analiza la distribución de PVC (policloruro de vinilo) a la salida del distribuidor así como sus zonas de estancamiento, comparando la operación de dos diferentes tipos de distribuidores: de cuchilla y de corazón, en función de parámetros geométricos. Se propone esta metodología para llegar al diseño óptimo de distribuidores dentro de las empresas productoras de cable eléctrico en nuestro país.

ABSTRACT

In Mexico, the extrusion process used for electrical wire is performed usually by imported machinery, being the main components the crosshead and the distributor. The main function of the distributor is to cover the wire with a uniform thickness of polymer. The lack of uniformity on the thickness will produce an increment on the economic costs to the company, as well as an important impact on the quality of the finished product. There are several types of distributors. This study analyzes the distribution of PVC (polyvinyl chloride) at the exit of the distributor, as well as the stagnation zones for two different types of commercial distributors: the Basic and the Heart-shaped, based on geometric parameters. This type of analysis is proposed to obtain the optimal design inside the engineering departments and shops of the electrical cable companies.

NOMENCLATURA

A_{st}	Área de estancamiento
b	Espesor del flujo de polímero
L	Ancho de la salida del deflector
Q_{op}	Caudal de operación de la extrusora
R	Radio de curvatura del distribuidor
V_b	Rapidez nodal del flujo
V_{prom}	Rapidez promedio teórica de salida
V_r	Razón de distribución del polímero
x_R	Coordenada en X de centro de curvatura
y_R	Coordenada en Y de centro de curvatura
δ	Desviación del polímero
$\dot{\gamma}$	Velocidad de deformación de referencia
η	Viscosidad aparente
μ_o	Viscosidad de referencia
θ	Coordenada Angular del distribuidor

INTRODUCCIÓN

La extrusión es el proceso de conformado de material forzándolo a través de un dado [1]. La extrusora de plásticos básica (figura 1) consiste de un husillo que va dentro de un cilindro cuyos propósitos son:

- Producir una fundición que sea plástica y térmicamente homogénea, y
- Proporcionar la fuerza necesaria para que el material fluya a una velocidad constante a través del dado.

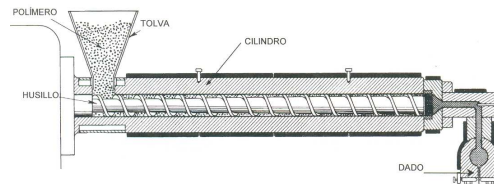


Figura 1. Sección esquemática de una extrusora típica de husillo.

El material termoplástico se alimenta en la tolva en estado sólido y sale como fundición caliente por el dado.

En el recubrimiento de cable eléctrico (que sirve tanto para aislarlo como para protegerlo) el alambre sigue el siguiente proceso: sale del carrete, llega a un precalentador, pasa a través del cabezal para ser recubierto, luego por una zona de enfriamiento, después pasa por un probador de aislamiento para finalmente ser almacenado en tambores (figura 2).

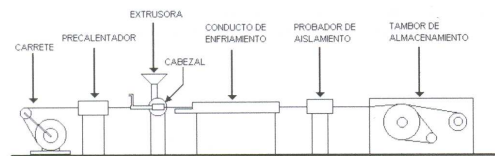


Figura 2. Línea de producción típica de una fábrica de cable eléctrico

La industria de cable eléctrico basa su producción en este tipo e proceso, lo cual hace imprescindible el correcto diseño y funcionamiento de cada uno de los elementos de la figura 2. Los componentes más importantes del equipo son la extrusora y el cabezal, ya que en ellos recae la función intrínseca de todo el sistema en conjunto.

En el cabezal, convergen el polímero fundido y el conductor (figura 3), para que por medio de una serie de elementos mecánicos y térmicos se obtenga la configuración final del producto. Además, el cabezal es el encargado de cambiar la dirección del flujo del polímero 90 grados con respecto al eje de la extrusora.

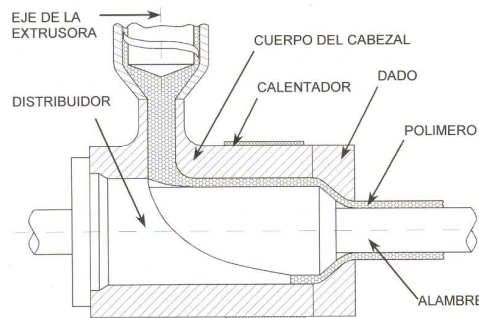


Figura 3. Esquema de un cabezal de extrusión

Existen en la industria cabezales de extrusión que permiten recubrir el alambre con varias capas de polímero. Sin embargo, el aislamiento de una sola capa como el que se muestra en la figura 3 se produce todavía en grandes cantidades.

El dado es la parte que da la forma final y mejora la distribución del polímero y aunque es un componente importante no recibe tanta atención como el distribuidor, que consta de dos partes principales (ver figura 4): la sección entre los ejes a-b se denomina deflector, mientras que la situada entre los ejes b-c se denomina punta [2]. La parte definida como R representa el radio de curvatura.

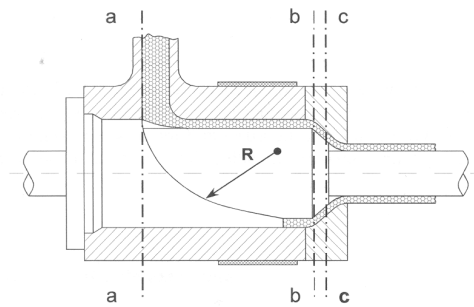


Figura 4. Cabezal de extrusión mostrando el distribuidor.

Dentro de las funciones del distribuidor esta:

- Distribuir uniformemente el polímero alrededor del cable, y
- Asegurar que las condiciones térmicas y mecánicas del polímero sean las adecuadas en todo momento dentro del cabezal.

La primera función tiene doble trascendencia:

- Comercial, pues una mala distribución del polímero alrededor del alambre (ver figura 5) representa pérdidas para la compañía, y
- Funcionalidad del producto, pues el cable debe satisfacer las normas de espesor y aislamiento para los cuales se fabrica [2][3].

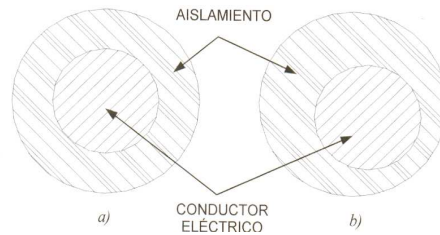
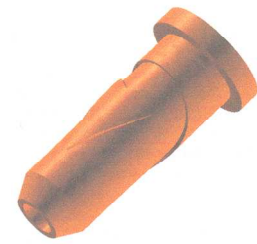


Figura 5. Distribución del aislamiento alrededor de un cable eléctrico: a) buena b) mala

La segunda función se refiere a que el polímero debe tener una homogeneidad adecuada en sus propiedades mecánicas en todo momento y que las características térmicas del proceso serán las adecuadas para lograr este objetivo. Ésto solo se puede lograr con el adecuado diseño del distribuidor y del cabezal en general.

Existen en la industria diferentes tipos de distribuidores. En la figura 6a se muestra un distribuidor de cuchilla. Éste representa uno de los diseños más básicos que existe aún en el mercado, mientras que la figura 6b muestra un distribuidor de corazón, el cual es ampliamente usado en la extrusión de cable eléctrico con una sola capa de aislante.



Durante la etapa de diseño, siempre se debe considerar la geometría del cabezal de extrusión y sobre todo del distribuidor, de manera que los canales y vías sean favorables al flujo del polímero. Por ejemplo, para materiales sensibles a la temperatura, como el PVC, es importante evitar los depósitos o estancamientos del material en las paredes del distribuidor y del cabezal, ya que conducirán a la degradación del material dentro del mismo [4]. Además, no se debe perder de vista el objetivo mismo del distribuidor: Crear las condiciones necesarias para que un flujo continuo, libre de pulsaciones constante, térmica y mecánicamente homogéneo salga del cabezal. Para ésto, deben tomarse en cuenta consideraciones reológicas, termodinámicas, de manufactura, así como operacionales.

En México, la industria productora del cable eléctrico ha estado presente desde la primera mitad del siglo XX, pero desde sus inicios, se ha tenido la necesidad de importar tecnología, haciendo a esta industria dependiente de los países más desarrollados. El análisis de maquinaria de extrusión de termoplásticos juega un papel muy importante en la optimización de este proceso y por lo tanto, la calidad del alambre o cable revestido depende en gran medida del adecuado diseño del cabezal y de sus partes.

CUERPO DEL TRABAJO

Este estudio se enfoca en proponer una metodología para el diseño de distribuidores, analizando particularmente dos tipos de ellos: el de cuchilla y el de corazón. Se analizaron éstos ya que son los más sencillos en cuanto a su diseño y son todavía usados en la industria en México.



a) b)

Figura 6. Diferentes tipos de distribuidores: a) de cuchilla y b) de corazón.

Debido a que la solución analítica de este tipo de sistemas está muy limitada, el análisis que se seguirá en este proyecto hacia la solución se basará en métodos numéricos. Aunque existen diferentes paquetes de métodos numéricos para analizar fluidos, se seleccionó FLOTRAN (ANSYS) debido a su disponibilidad.

El polímero a analizar será el PVC, debido a que es el más utilizado para revestir cables eléctricos y a que se cuenta con la reología completa para este plástico [5].

Además, para simular el fluido, se tomaron en cuenta las siguientes simplificaciones (ver figura 7):

- Simetría
- Flujo rectangular (en lugar del modelo real anular) [2]
- Estado Estable
- Flujo Isotérmico [2]
- Flujo laminar
- Flujo incompresible [2]
- Temperatura de operación de 185°C [5]

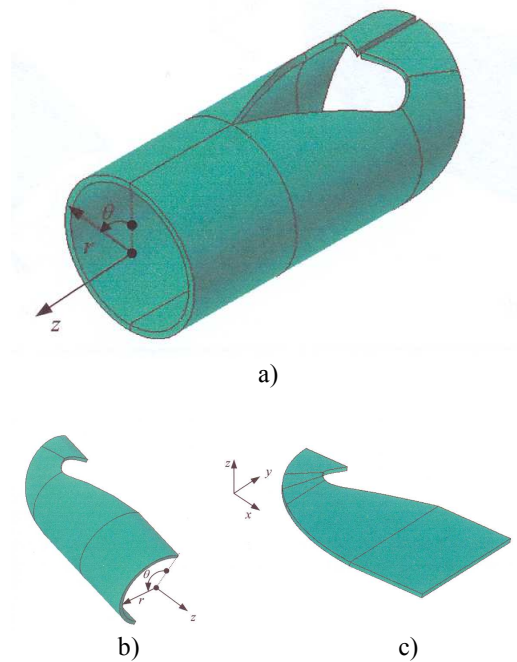


Figura 7. a) Flujo real del polímero a través de un distribuidor de corazón. b) Simplificación geométrica por simetría. c) Simplificación a modelo rectangular en lugar de anular.

Se usara un modelo reológico que complementa un modelo Newtoniano para bajas velocidades con la famosa Ley de Potencias [1]. Ésto conduce a :

$$\eta = \begin{cases} \mu_o \dot{\gamma}^{n-1} & , \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_o \\ \mu_o \dot{\gamma}_o^{n-1} & , \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_o \end{cases}$$

(1)

donde μ_o es la viscosidad de referencia, obtenida experimentalmente; $\dot{\gamma}_o$ es la velocidad de deformación de referencia (también obtenida experimentalmente) y η es la viscosidad aparente.

Pérez [5], obtuvo en 1998 los coeficientes empíricos para la ecuación 1, en un PVC a 185°C. Estos coeficientes son:

$$\begin{aligned}\mu_o &= 17\,043.7 \text{ Pa}\cdot\text{s} \\ n &= 0.241 \\ \dot{\gamma}_o &= 10 \text{ s}^{-1}\end{aligned}$$

y son los que se usaron para simular el flujo del PVC dentro del cabezal del extrusor.

Ya que el flujo del polímero dentro del cabezal también depende en gran medida de la geometría que tenga el distribuidor, se analizó el efecto del radio de curvatura (R) sobre la distribución del polímero a la salida de la zona del deflector (eje b-b en la figura 4) y sobre las zonas de estancamiento de material que se pueda presentar dentro del mismo flujo. Así mismo, se establecen los parámetros x_R y y_R , que definen la posición del radio de curvatura R (ver figura 8). Durante el análisis, varias combinaciones de parámetros fueran analizadas, de acuerdo a la tabla 1.

Aunque la sección de la punta del distribuidor (sección b-c de la figura 4) mejora enormemente la distribución del polímero [2], ésta no se incluyó en el análisis con el fin de aislar el efecto neto del radio de curvatura. Por tanto, se analizó el flujo de PVC dentro de la zona del deflector, en base a dos criterios de diseño:

1. Distribución de polímero a la salida del deflector, y
2. Zonas de estancamiento a lo largo del flujo.

Existen muchos otros criterios que pueden tomarse en cuenta a la hora de hacer el diseño, pero están fuera del alcance de este proyecto.

La zona de estancamiento se define como aquella en donde las velocidades son menores a la velocidad de salida, lo que provoca que el polímero aumente su tiempo de residencia dentro del cabezal, conllevando a la posible degradación del polímero.

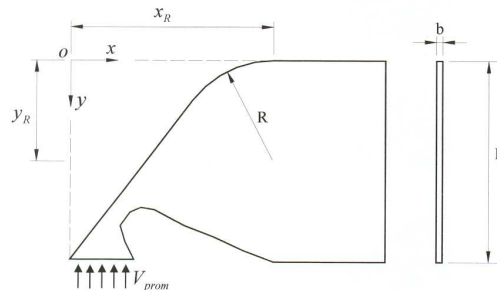


Figura 8. Definición de parámetros geométricos

Tabla 1. Geometrías sujetas a análisis.

RESULTADOS

De acuerdo a la sección anterior, uno de los parámetros a analizar será la distribución del polímero a la salida del deflector del distribuidor. Ya que una medida de la distribución del polímero es la distribución del caudal, y una medida de ésta es el perfil de velocidad, entonces se definirá un parámetro adimensional V_r , que se llamara Razón de Distribución [2] y que está definida como:

$$V_r = \frac{V_b}{V_{prom}}$$









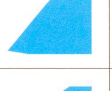

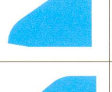



(2)

donde V_b es la velocidad nodal a lo largo del espesor del distribuidor en la sección de salida del deflector y V_{prom} es la velocidad teórica del mismo punto si el flujo fuera uniformemente distribuido, es decir, V_{prom} está dado por (ver figura 8):

$$V_{prom} = \frac{Q_{op}}{2bL}$$

(3)

Se desarrollaron aproximadamente 80 iteraciones para lograr la solución y convergencia del modelo numérico. Las curvas de distribución ($V_r-\theta$) para el flujo a través del distribuidor de cuchilla para las diferentes geometrías se presenta en la figura 9, en donde la coordenada θ está definida de acuerdo a la figura 7. Esto se hace para registrar los resultados en base al modelo anular real [2]. De igual forma, se presentan los resultados para el distribuidor de corazón en la figura 10.

$\frac{R}{L}$	$\frac{y_R}{x_R}$	NOMBRE DESCRIPTIVO	GEOMETRÍAS DE FLUJOS	
			DISTRIBUIDOR DE CUCHILLA	DISTRIBUIDOR DE CORAZÓN
1	1	ESTÁNDAR		
2	1	GRANDE		
∞	1	INFINITO		
$\frac{1}{2}$	1	IZQUIERDO		
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	DERECHO		
$\frac{1}{2}$	2	INFERIOR		
1/2 DOBLE	2 y 1/2	DOBLE		

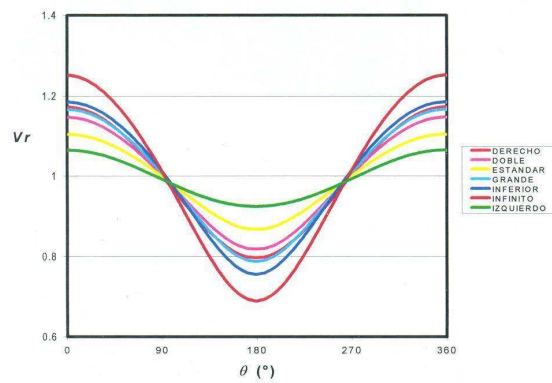


Figura 9. Curvas de distribución para el flujo a través del distribuidor de cuchilla para las diferentes geometrías.

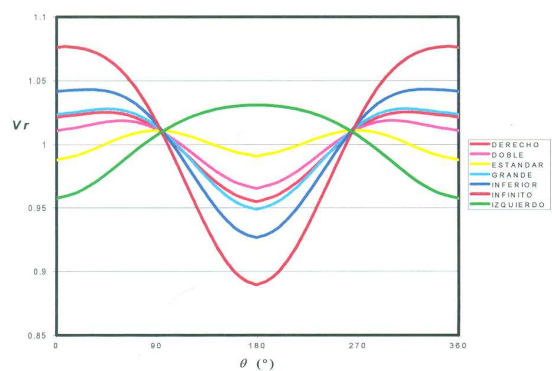


Figura 10. Curvas de distribución para el flujo a través del distribuidor de corazón para las diferentes geometrías.

Los dos tipos de cabezales presentan zonas de estancamiento, que varían en porcentaje del área total y estos resultados se presenta en la tabla 2.

Tabla 2. Porcentaje de Áreas de Estancamiento porra las diferentes geometrías, tomando como base el área total.

GEOMETRÍA	DISTRIBUIDOR DE CUCHILLA	DISTRIBUIDOR DE CORAZÓN
ESTÁNDAR	0	0
GRANDE	4	4
INFINITO	5	8
IZQUIERDO	30	15
DERECHO	15	6
INFERIOR	8	4
DOBLE	10	5

Considerando que una geometría perfecta nos produciría un flujo uniforme a la salida del deflector (es decir, $V_r=1$ para toda θ) y observando que en las figuras 9 y 10 la distribución del polímero dista mucho de esta característica, se estableció un parámetro que permitió medir qué tan alejada esta la distribución del flujo de ser perfecta. A este parámetro se le llamó *desviación del polímero*.

La desviación del polímero, δ , se definió como la lejanía, en porcentaje, del valor de V_r , en relación al flujo perfecto (en el cual $V_r=1$), para cada θ en cada curva de distribución, es decir,

$$(4) \quad \delta = 100|1 - V_r|$$

Partiendo de la ecuación 4, se deduce que el valor de δ varía con la coordenada θ , y por tanto, para cada curva de distribución de polímero existe un δ_{\max} , que corresponde con el máximo o mínimo de esa curva. Por ejemplo, en la figura 10, el mínimo ocurre aproximadamente en $\theta=180^\circ$ para un distribuidor de corazón con radio infinito. Si V_r en ese punto es aproximadamente 0.89 (un mínimo) entonces:

$$\delta_{\max} = 100|1 - 0.89| = 11\%$$

Con el fin de analizar los resultados y poderlos comparar entre diferentes geometrías y diferentes distribuidores, se graficó el valor absoluto de la máxima desviación del polímero δ_{\max} en porcentaje, para los diferentes valores de R/L .

En la figura 11 se presentan los resultados de la máxima desviación δ_{\max} y el área de estancamiento en porcentaje, A_{st} , para el flujo a través del distribuidor de cuchilla, mientras que la figura 12 presenta los resultados para el distribuidor de corazón. Para ambas figuras, los datos corresponden a un valor de $\frac{y_R}{x_R} = 1$.

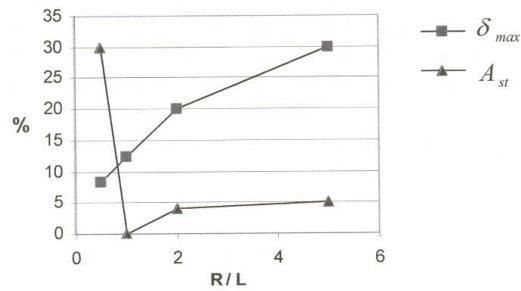


Figura 11. Análisis para el flujo a través del distribuidor de cuchilla para $\frac{y_R}{x_R} = 1$

De acuerdo a las figuras 11 y 12, cuando $R > L$, si se eleva el valor del radio de curvatura, se aumenta la desviación del polímero alrededor de la salida del deflector, mientras que para $R < L$ el efecto varía de acuerdo al tipo de distribuidor: para el distribuidor de cuchilla disminuyó la desviación, mientras que para el de corazón aumentó.

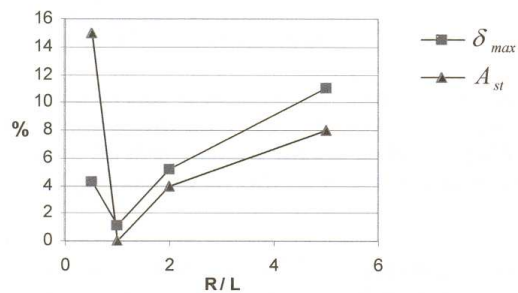


Figura 12. Análisis para el flujo a través del distribuidor de corazón para $\frac{y_R}{x_R} = 1$

El estancamiento en estas figuras varía de manera que se obtiene un mínimo que se encuentra en $R/L=1$

La desviación del polímero es el principal criterio de diseño de distribuidores, de manera que el espesor de cable debe tener un valor mínimo. Existen diferentes normas a nivel internacional que regulan el espesor mínimo de polímero. Estas normas deben servir como límites para poder decidir si los valores de δ_{max} que se obtienen son permisibles.

En base a las consideraciones anteriores se plantea una propuesta sobre la metodología para el diseño de distribuidores de extrusión para la fabricación de cable eléctrico, figura 13. Con ayuda de esta metodología y específicamente de las figuras 11 y 12, se pueden comparar resultados entre diferentes geometrías y poder establecer cual es el diseño adecuado.

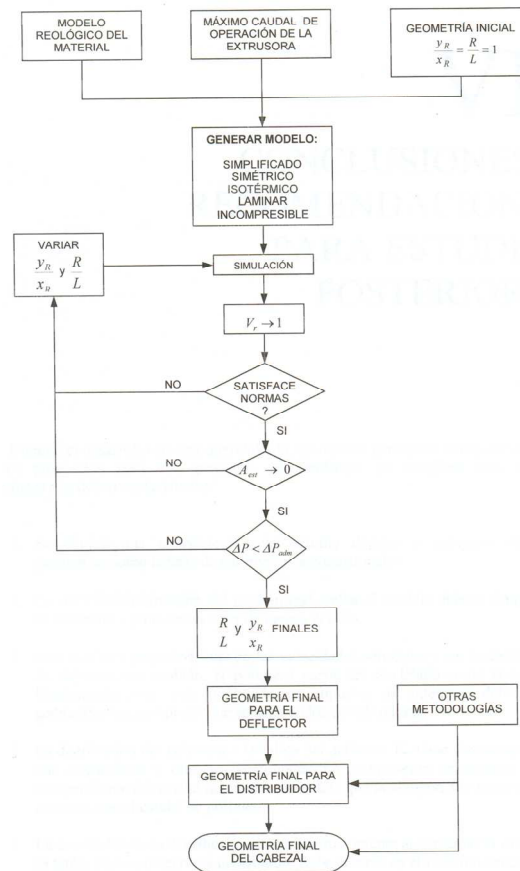


Figura 13. Metodología para el diseño de distribuidores

CONCLUSIONES

La metodología propuesta para analizar la distribución del polímero a la salida del distribuidor por medio de las Curvas de Distribución, constituye una herramienta importante durante las fases de diseño del distribuidor. Así mismo, el conocer el área de estancamiento para las diferentes geometrías permite incluir esta variable en el análisis para poder así llegar a una solución optima. Las soluciones numéricas a este tipo de problemas, permiten pronosticar el comportamiento del polímero durante la operación del cabezal e identifican zonas que potencialmente pudieran degradar al material.

Un aspecto muy importante para la aplicación de la metodología propuesta es contar con la caracterización reológica completa del termoplástico de trabajo, necesaria para la simulación en computadora, y de esta forma, contar con resultados reales.

REFERENCIAS

- [1] Tadmor, Z., Klein. I., 1970, *Engineering Principles of Plastification Extrusión*, Polymer Science and Engineering Series, SPE, New York, N.Y., páginas 1-40.
- [2] Fenner, R.T. y Nadiri, F., 1979, "Finite Element Analysis of Polymer Melt Flow in Cable-Covering Crossheads", *Polymer Engineering and Science*, Vol. 19, No.3, páginas 203-209.
- [3] Hanssen, D.M., 1991, "Optimization of the Polymer Melt Thickness Distribution on a Cable of Large Diameter", *Polymer Engineering and Science*, Vol.31, No.16, páginas 1165-1171.
- [4] Toner, R.I., 1984, "Problems and Progress in Polymer Extrusion Studies", Numerical Analysis of Forming Processes, editores: Pittman J.F.T., Zienkiewics O.C., Wood R.D., Alexander J.M., University College Swansea, University of Waley, Swansea, UK, páginas 285-306.
- [5] Pérez, E., 1998, "Desarrollo de los Perfiles de Presión en extrusores Plastificadores de Tornillo Simple", Tesis Doctoral, Universidad de Guanajuato. Salamanca, Gto. México.