

# Una Revisión de Sistemas de Calentamiento y Control de Temperatura para Extrusión de Polímeros

## A Review of Heating Systems and Control Temperature for Polymer Extrusion

Gloria Cruz<sup>1</sup>

Fecha de recepción: Febrero 27 de 2014

Fecha de aceptación: Septiembre 24 de 2014

### Resumen

La conversión a gas puede permitir una disminución en el costo energético de 60% en procesos de extrusión de plástico. Este artículo presenta una revisión sobre iniciativas relacionadas con: calentamiento a gas del barril de extrusión, otros sistemas de calentamiento, modelado y simulación de perfiles de temperatura, procesamiento de polímeros, influencia de la temperatura de fusión en el producto extruido y control de temperatura.

Por medio de este artículo se concluye que el calentamiento a gas es más eficiente que el calentamiento por resistencias eléctricas en el procesamiento de polímeros, y la importancia del desarrollo de un modelo predictivo de control de temperatura para esta conversión es resaltada.

**Palabras clave:** extrusión de polímeros, sistemas de calentamiento, gas natural, control de temperatura, costo energético.

---

1    Docente Institución Universitaria Pascual Bravo. gloria.cruz@pascualbravo.edu.co

## Abstract

The gas conversion may allow a reduction in the energy cost of 60% in plastic extrusion processes. This paper presents a review on initiatives related to: gas heating of extruder barrel, other heating systems, modeling and simulation of melt temperature profiles, influence of the melt temperature in the extruded product and temperature control. By way of this article concludes that the gas heating is more efficient than electric resistance heating in the polymer processing, and the importance of the development a predictive model of temperature control for this conversion is emphasised.

**Keywords:** polymer processing, natural gas, temperature barrel, energy cost.

## 1. Introducción

En pequeñas industrias se ha comenzado a observar la conversión a gas de las unidades de calentamiento de plástico, mediante el uso de quemadores tipo flauta. Estas iniciativas no se han masificado porque la temperatura de los gases de combustión es muy alta, afectando el funcionamiento de la extrusora y la calidad del producto extruido, si no se tiene un control de temperatura diseñado para esta innovación. De acuerdo con <sup>[1]</sup> en Colombia el consumo de energía eléctrica para este sector ascendió en 2007 a 1.621,7 millones de kilovatios-hora, equivalente al 11,2% de la energía utilizada por la industria manufacturera Colombiana. En Colombia no se han tomado medidas de ahorro energético intensivas para este sector como es el caso de los países europeos, quienes han liderado una iniciativa de ahorro energético en el procesamiento del plástico denominada RECIPE (Reduced Energy Consumption in Plastics) <sup>[2]</sup>, la cual ha llevado a cabo una encuesta finalizada en 2007, cuyos resultados permitieron estimar que una reducción del consumo de energía en la industria del plástico de 10% permitiría una reducción anual de 3 millones de toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub>. También es importante resaltar de RECIPE que aproximadamente el 70% de los productos termoplásticos son procesados mediante extrusión. El precio de la electricidad en Alemania en junio de 2007 fue aproximadamente el 63% más alto que el de enero de 2002, esto motivó a que las siguientes empresas conformaran un equipo para desarrollar un prototipo para el calentamiento a gas de una inyectora de plástico: Wema, fabricantes de sistemas de calentamiento para extrusoras e inyectoras de plástico; Ruhrgas, proveedores de plantas a gas; Plastal, planta procesadora de artículos plásticos; y Krauss Maffei, empresa fabricante de máquinas para el procesamiento de plástico. Esta se considera la primera iniciativa de conversión a gas en una planta de inyección.

## 2. Iniciativas de calentamiento a gas del barril de extrusión

En el proceso de extrusión, como se muestra en la Fig. 1, el polímero es transportado por un tornillo y fundido por la fricción generada en dicho movimiento y por el sistema de calentamiento, cuya fuente de energía puede ser la electricidad o un combustible como el gas natural.

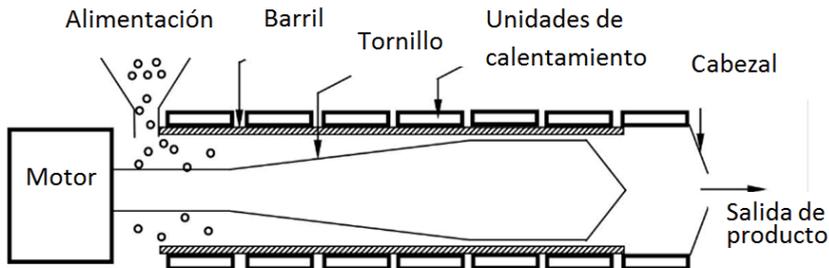
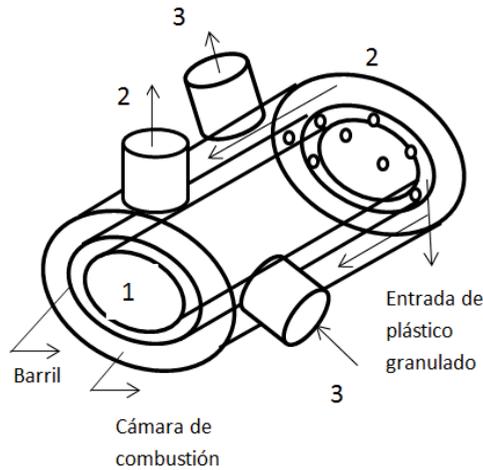


FIGURA 1. Extrusión de polímeros, tomado de [3].

En el sistema a gas [4], como se muestra en la Fig. 2, la energía necesaria para fundir el polímero, calentarlo y transportarlo es generada por el tornillo(1) y una unidad de calentamiento-enfriamiento por donde fluyen los gases de combustión (2) y el aire forzado para enfriamiento (3). El enfriamiento en extrusión es estudiado por [5], quienes obtuvieron un coeficiente de transferencia de calor para enfriamiento con aire forzado y [6], quienes comparan el consumo de potencia de los sistemas de enfriamiento con aire y con agua y recomiendan el enfriamiento con aire para la mayoría de las aplicaciones y con agua en donde se requiera una mayor transferencia de energía para mantener la temperatura de proceso.

En [7] se resalta la importancia de la modelación experimental del calentamiento a gas en extrusión, porque con base en 1 kWh consumido en producción, ambos sistemas, gas y resistencias eléctricas, generan las mismas pérdidas por disipación en el entorno, pero respecto al transporte en la red de distribución las pérdidas eléctricas son aproximadamente doce veces más altas que las pérdidas de energía en la red de gas. De acuerdo con [3], la conversión a gas en Pymes de Medellín y el Área Metropolitana tiene un potencial de ahorro en el costo energético cercano a 60%, debido a que el consumo energético en el arranque es despreciable; teniendo en cuenta el

calentamiento a gas, adicionalmente a la transferencia de calor por conducción del barril al polímero, se tiene la transferencia de calor por convección de los gases de combustión.



**FIGURA 2.** Sistema de plastificación a gas. Adaptado de [4].

La literatura sobre el tema específico de calentamiento a gas del barril de extrusión comienza en 2003 con el encuentro internacional Kunststoffe en Alemania, donde [8] enuncia los aspectos que se deben tener en cuenta para implementar un quemador a gas para esta aplicación: pocas modificaciones en la unidad de calentamiento comparado con las resistencias eléctricas convencionales, estructura modular para tener la opción eléctrica o de gas, operación similar a las resistencias eléctricas de tal forma que no aumente el número de operarios, facilidad para revisar los elementos de calentamiento y técnicas para la regulación del consumo, sistema de enfriamiento con aire, control de temperatura instantáneo y preciso, precisión en el control a altas temperaturas y bajo costo energético comparado con las resistencias eléctricas. Recientemente [9][10] definen las condiciones de frontera, las características de mallado y obtienen mediante simulaciones en estado estacionario perfiles de temperatura, que buscan evitar la degradación del polímero extruido mediante la variación de la relación aire-combustible.

### 3. Otros sistemas de calentamiento del barril de extrusión

La forma como actualmente se realiza el calentamiento del barril de extrusión en la mayoría de las empresas del sector es mediante resistencias eléctricas. Hay diferentes tipos de estas como son las tubulares, tipo cartucho y tipo banda.

**TABLA 1.** Capacidad de calentamiento de resistencias eléctricas. Adaptada de <sup>[11]</sup>

Tipo de resistencia	Capacidad de calentamiento [W/pulg <sup>2</sup> ]
Tubular	20-40
Cartucho	40
Banda	30-40

El calentamiento del barril por inducción es una alternativa a las resistencias eléctricas convencionales, su principio de funcionamiento consiste en la generación de un campo magnético en el sistema mediante el suministro de potencia de alta frecuencia, en una bobina helicoidal de inducción, la cual genera un flujo de electrones en el barril metálico y de esta forma es como el barril se calienta. Se interpone una capa de aislante térmico entre la bobina y el barril para evitar pérdidas por radiación y convección con el ambiente y mantener la bobina fría<sup>[12]</sup>. La ventaja de este sistema frente a las resistencias eléctricas convencionales es la reducción de costos energéticos los cuales varían en cada zona del tornillo y dependen también del tipo de material, en promedio se obtienen ahorros cercanos al 60% del consumo energético con un control de temperatura más cercano al punto de ajuste que el obtenido con resistencias eléctricas<sup>[13]</sup>.

### 4. Modelado y simulación de perfiles de temperatura en extrusión

La dificultad en la modelación de la plastificación de poliolefinas, como el polietileno y el polipropileno, radica en el hecho de que estos materiales son no newtonianos, es decir que al fundirse reducen su viscosidad con la tasa de corte, siendo esta la diferencia entre las velocidades de dos capas de fluido en razón de la distancia que las separa. En el proceso de extrusión de plástico

estos polímeros son fuertemente no newtonianos, el modelo de Carreau-Yasuda estudia este fenómeno, considerando el calentamiento por efectos viscosos ocasionados en el canal de extrusión, en la holgura entre el tornillo y el barril y por el gradiente de presión axial en el canal; es un modelo del que solamente se han obtenido soluciones numéricas, como en los trabajos de <sup>[14]</sup>-<sup>[16]</sup> en los cuales se ha utilizado para obtener perfiles de temperatura, consumo de potencia y coeficientes de transferencia de calor mediante métodos numéricos o programas de simulación. Tadmor, en <sup>[17]</sup> es el pionero en el análisis matemático del procesamiento de plásticos, diferenciando dos zonas dentro del canal de extrusión: la cama del sólido y el pozo de polímero fundido, como se muestra en la Fig. 3. En <sup>[18]</sup> se obtiene un perfil de temperatura para el pozo de polímero fundido, y en <sup>[19]</sup> se patenta un dispositivo para visualizar en línea la fusión de polímeros, utilizando este dispositivo. En <sup>[20]</sup> presentan la existencia de un retardo en la fusión ocasionado por el hecho de que el polímero fundido debe llenar los espacios del material sólido granulado.

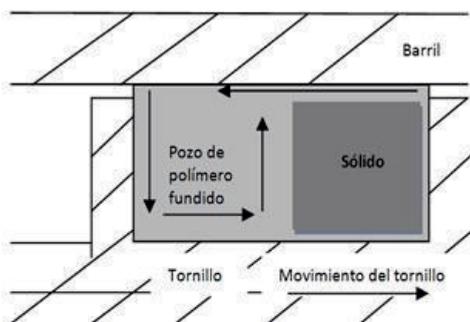


FIGURA 3. Extrusión de polímeros. adaptado de <sup>[21]</sup>.

Un modelo computacional para extrusora de un tornillo (Single-Screw Extrusion Model SSEM), desarrollado para diferentes geometrías de tornillo y dado de extrusión es presentado en <sup>[23]</sup>; este modelo puede predecir flujo másico, perfiles de temperatura y presión, no utiliza elementos finitos sino el cálculo de algoritmos en Turbo Pascal, sin embargo, el autor solamente presenta los resultados obtenidos para la presión. En <sup>[24]</sup> se presenta un estudio sobre la influencia del efecto viscoso en el perfil de temperatura en tubos, este caso es llamado el problema de Graetz-Nusselt, el cual se estudia hace

cien años, pero lo retoman para fluidos no-newtonianos, obteniendo un perfil de temperatura tridimensional en función de la fracción radial y la fracción longitudinal, como se observa Fig. 4.

Según los autores de la referencia [26], en donde se realiza una simulación y validación experimental del proceso de extrusión mediante Polyflow de ANSYS, se concluye que el exponente de la ley de viscosidad de Carreau-Yasuda tiene una influencia bastante significativa en la simulación; se recomienda incluir en próximos estudios las propiedades viscoelásticas del material, el efecto de transferencia de calor por radiación para la superficie del fluido y utilizar una malla menos uniforme.

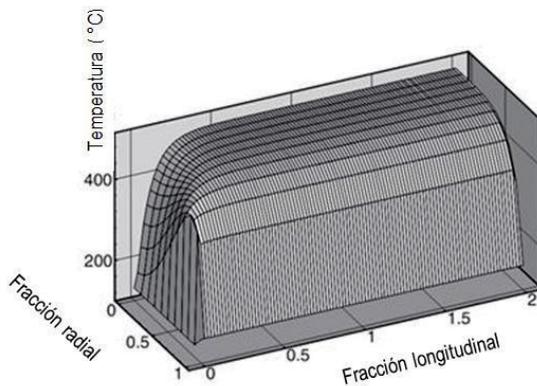


FIGURA 4. Perfil de temperatura. adaptado de [24].

## 5. Influencia de la temperatura de proceso en el producto extruido

Los picos de temperatura pueden ocasionar la degradación del polímero y un perfil de temperatura poco homogéneo genera problemas de calidad en el producto extraído. En [27] muestran en su estudio experimental, donde los defectos volumétricos son muy sensibles a la temperatura del polímero, siendo el comienzo de estos defectos apreciables con variaciones de temperatura de 10°C. En [28] consideran que los cambios estructurales irreversibles durante la extrusión de PET reciclado están relacionados con el proceso de oxidación de las cadenas y recomiendan el uso de antioxidantes para mejorar la calidad del producto pero consideran que esto se dificulta si el perfil de temperatura del proceso no es homogéneo. En [29] determinan, mediante

un estudio experimental, que las propiedades reológicas del polipropileno se ven afectadas en los procesos de extrusión múltiple propios del reciclaje debido a la fractura de macromoléculas, ocasionando disminución del peso molecular, la viscosidad y la elasticidad del polímero fundido, coincidiendo con los autores anteriores en que las altas temperaturas y la poca homogeneidad del perfil de temperaturas influyen de manera significativa en este fenómeno. Los siguientes trabajos muestran en sus estudios sobre reología la influencia de la temperatura en el proceso de extrusión: <sup>[30]</sup> realizó este tipo de estudios en poliolefinas; en <sup>[31]</sup> desarrollan una prueba para caracterizar la viscosidad del polímero, variando la temperatura y la tasa de corte y considerando otros parámetros como: velocidad (rpm) del husillo, tiempo de residencia y geometría del sistema; en forma similar <sup>[32]</sup> proponen un modelo empírico que relaciona la viscosidad con la temperatura de proceso y la velocidad del husillo; en el trabajo <sup>[33]</sup>, se resalta la importancia de mantener una temperatura uniforme para determinar las propiedades reológicas del polímero, el autor realizó mediciones de tasa de corte en polipropileno de baja densidad, policarbonato y poliestireno; en el trabajo de <sup>[34]</sup> se muestra que los picos de temperatura afectan la capacidad de movimiento de las macromoléculas y por lo tanto las propiedades reológicas del polímero, la experimentación se realizó con polietileno de baja densidad. Con esta apreciación coinciden en <sup>[35]</sup>, donde se realiza un estudio experimental sobre el fraccionamiento del peso molecular en la extrusión de polietileno de alta densidad.

## 6. Control de temperatura en extrusión

En extrusión de poliolefinas es muy extendido el uso del control proporcional integral derivativo (PID). En el trabajo de <sup>[36]</sup> se reportan para esta aplicación variaciones en la temperatura, medida respecto a la temperatura de ajuste que pueden llegar a 28°C, es por esto que se deben sintonizar sus parámetros como son: la ganancia proporcional, tiempo proporcional y tiempo derivativo en función de la velocidad (rpm) del tornillo, la energía transferida por fricción del tornillo al polímero y la propagación de la onda de presión en el polímero; en concordancia con esto, una iniciativa conjunta de Promoplast, la Universidad de Bérgamo, el Politécnico de Milán y el Centro Europeo para el Desarrollo de Aplicaciones del Plástico <sup>[36]</sup>, tuvo como resultado la modelación, diseño y prueba de un control de flujo volumétrico en tiempo real

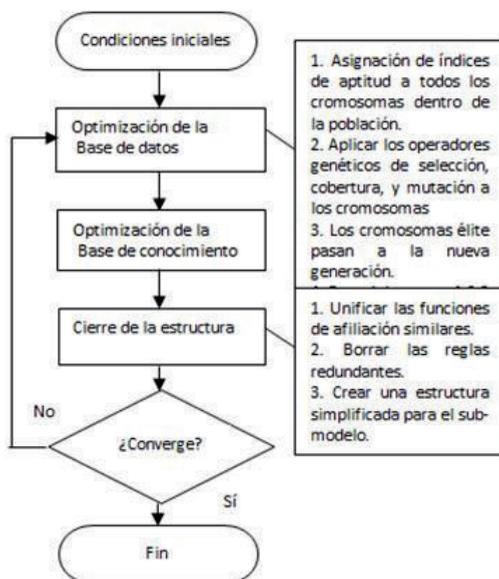
con retroalimentación para una extrusora de tornillo simple. El control cumple con tres tareas: control de temperatura a lo largo del barril, control de temperatura de salida y control de presión de salida en la extrusora. Obtienen la función de transferencia para el calentamiento del barril y del polímero con resistencia eléctrica y control PID. Utilizando retroalimentación y una sintonización de parámetros PID, adecuada a las condiciones de proceso, se obtiene una regulación muy cercana al punto de ajuste y una rápida reacción frente a las perturbaciones en las condiciones de operación, tales como los cambios inesperados en la calidad del material. Para demostrar esto, se realizó la validación experimental para polipropileno virgen y remolido y para polietileno y poliestireno.

La dificultad en la solución analítica de las ecuaciones diferenciales, que rigen la temperatura de proceso, motiva a la utilización de técnicas de inversión en las cuales a los datos obtenidos por medición directa se les aplican algoritmos que permitan obtener una ecuación para la temperatura. Esta técnica fue aplicada por <sup>[37]</sup> para la extrusión de un polímero no newtoniano, como es el poliestireno, en estado no estacionario; en este trabajo se realiza la simulación del modelo mediante el método de volúmenes finitos con el programa computacional AQUILON® <sup>[38]</sup>, llegando a determinar que la principal causa de error es no haber considerado la dependencia entre viscosidad y presión. Esta técnica de inversión recientemente fue aplicada por <sup>[39]</sup> utilizando la herramienta de Análisis de Flujo por Solución Inversa de Ecuaciones de Transporte (FASTEST3D) de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de Ansys-fluent, para solucionar las ecuaciones de momentum, los autores consideran como principales causas de error la precisión de los sensores de temperatura y las zonas de discontinuidad en el perfil.

Actualmente, para extrusión de poliolefinas, los modelos predictivos se obtienen mediante algoritmos que aplican técnicas estadísticas y reglas basadas en lógica difusa, genética, entre otras; los controles obtenidos con estas técnicas se denominan computación liviana (soft computing) como los que se indican a continuación.

En <sup>[40]</sup>, se obtienen las ecuaciones diferenciales respecto al tiempo de la velocidad de transformación del sólido en el polímero fundido y de la temperatura de este último. Dada la complejidad de la solución determinística de estas ecuaciones, en <sup>[41]</sup> se plantea estudiar su solución como una caja gris o

modelo semi-físico, en el cual hay datos que se conocen de las ecuaciones que rigen el fenómeno y otros desconocidos, de esta manera resuelven el modelo semi-físico en forma estadística, permitiendo que aprenda a mejorarse a sí mismo con algoritmos usados en reglas de lógica difusa y genética. Es importante notar que los modelos semi-físicos pueden violar las leyes físicas en un momento dado pero se pueden corregir en el tiempo. Es una forma inteligente de iterar que permite utilizar un programa computacional liviano, apto para hacer control en tiempo real, adaptándose a perturbaciones como cambio del material a procesar, variación en la temperatura del barril, la velocidad (rpm) del husillo o la presión. Obtienen predicciones para la temperatura promedio (bulk temperature) en función del tiempo.



**FIGURA 5.** Algoritmos genéticos y de lógica difusa aplicados a modelos semi-físicos. Adaptado de [35].

En [42] se obtiene un modelo para optimizar la homogeneidad de temperatura en la sección transversal del cabezal de extrusión en estado estacionario, el cual utiliza algoritmos de optimización evolutiva como son la evolución diferencial (DE), inspirado en la biología y la optimización de enjambre de partículas (PSO), inspirado en las conductas sociales; ambos son métodos de

iteración utilizados para escoger un candidato a solución de acuerdo con una medida de calidad y son recomendados para determinar soluciones no lineales. Obtienen un modelo de sexto orden con doce términos para la temperatura del polímero en el cabezal de extrusión en función de la temperatura del barril, la velocidad (rpm) del tornillo y la distancia radial. Las mediciones de temperatura en el cabezal las realizan con una malla de termocuplas, a bajas velocidades (10 rpm) obtienen reducciones hasta del 60% en la fluctuación de la temperatura mientras que a mayores velocidades (90 rpm) esta reducción es poca, teniendo un mínimo de 3%.

Una vez obtenido el modelo predictivo es importante considerar las estrategias de control para optimizar su implementación. En <sup>[43]</sup> se presenta el control de la temperatura del barril de una inyectora, mediante la implementación de un control de un lazo cerrado de aprendizaje iterativo (Iterative Learning Feedforward –ILFF) para ajustarse a perturbaciones (como cambio de material) y que minimice las variaciones en la temperatura, esto con el objeto de evitar la degradación del producto; en las etapas que denominan de reposo, es decir en las que no hay perturbaciones, la estrategia de control que proponen es el método de Control Predictivo Generalizado (GPC) para optimizar la secuencia de los movimientos de control futuro de acuerdo con el modelo predictivo. Esta propuesta de control se adapta a las etapas estacionarias y a los transientes, característicos del procesamiento de polímeros.

Una de las principales dificultades en la validación de modelos predictivos en estos procesos es la precisión de los sensores de temperatura. En los procesos de producción se utilizan sensores no invasivos, los cuales no interfieren con el flujo de polímero fundido; esta condición es necesaria en los procesos industriales, y en el caso de las termocuplas, van alojadas en un agujero no pasante ubicado en el barril de extrusión. Para mediciones de laboratorio, en <sup>[44]</sup> recomiendan un sensor invasivo como es la malla de termocuplas, esta se ubica en toda la sección transversal al flujo de polímero, por lo tanto tiene contacto directo con el polímero. Es más sensible a las variaciones de temperatura para diferentes condiciones de proceso como la velocidad (rpm) del husillo, mientras que los sensores no invasivos tienden a registrar una temperatura constante similar a la temperatura del barril.

En <sup>[45]</sup> se presentan las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de sensores utilizados en extrusión, como son: termocuplas, termómetros de

infrarrojos (IR), ultrasonido y colorantes fluorescentes. Este último consiste en dopar el polímero con colorantes fluorescentes sensible a la temperatura, de tal forma, que las variaciones de temperatura ocasionan cambios en el espectro fluorescente.

**TABLA 2.** Sensores de temperatura. Adaptada de [45]

Método	Características	Invasivo	Respuesta dinámica	Fuente
Termocupla montada en pared	Temperatura promedio (bulk temperature), afectada por la temperatura de pared	No	~1 s	[46]
Termocupla saliente	Perfil de temperatura, interrumpe el flujo de polímero, error por conducción en su longitud y por calentamiento viscoso alrededor de la punta	Sí	>1 s	[47]
Termocupla atravesada	Perfil de temperatura, sujeta a errores por conducción y calentamiento viscoso	Sí	~1 s	[48]
Malla de termocuplas	Múltiples mediciones, da perfil de temperatura en dos dimensiones	Sí	~0.1 s	[49] - [50]
IR de no contacto	Temperatura promedio sobre un volumen cónico cercano a la pared, la medida depende del tipo de material	No	10 ms	[51]
Ultrasonido	Temperatura promedio a través de la línea central de flujo, requiere calibración para cambios de presión y tipo de material	No	~1 ms	[52]
Colorantes fluorescentes	Perfil de temperatura, dependencia del tipo de material	No	~0.5 s	[53]

## 7. Conclusiones

El sistema de calentamiento a gas ocasiona cerca de doce veces menos pérdidas en el transporte de energía por cada kilovatio-hora utilizado en el procesamiento de plástico, comparado con los sistemas que utilizan energía eléctrica; adicionalmente, permite ahorro en el costo energético porque consume menos energía en el arranque, en virtud de la transferencia de calor por convección de los gases de combustión.

En uno de los trabajos revisados se ha comprobado experimentalmente que variaciones de 10°C en el proceso de extrusión producen defectos vo-

lumétricos apreciables en el producto extruido, y otros trabajos confirman que la falta de homogeneidad en el perfil de temperaturas puede ocasionar daños estructurales en las cadenas del polímero, principalmente en los procesos de reciclaje en los cuales se dan múltiples etapas de extrusión. Las dimensiones y velocidad del tornillo, las propiedades reológicas del polímero fundido y la temperatura del barril son los parámetros fundamentales para determinar el perfil de temperatura del polímero fundido. La variación de la viscosidad con las altas tasas de corte que se presentan en el proceso de extrusión de polietileno y polipropileno como fluidos no newtonianos hace que el efecto de calentamiento viscoso en este proceso sea bastante considerable, para cuantificarlo, se ha extendido en la literatura sobre el tema la utilización del modelo de Carreau-Yasuda, porque tiene en cuenta el calentamiento por efectos viscosos ocasionados en el canal de extrusión, en la holgura entre el tornillo y el barril y por el gradiente de presión axial en el canal. Con este modelo se han obtenido mediante métodos numéricos, perfiles de temperatura y coeficientes de transferencia del calor entre el polímero y el barril de extrusión, aplicables a bajas rpm, la precisión disminuye a altas rpm de producción industrial.

La dificultad en la solución analítica de las ecuaciones que rigen los fenómenos de transporte en el proceso de extrusión crea la necesidad de aplicar modelos predictivos de programación liviana o de sintonización de los parámetros de control proporcional, integral y derivativo (PID). Una importante causa de error en la validación experimental de estos modelos está relacionada con la selección y calibración de los sensores. Se debe considerar que los sensores no invasivos, los cuales son los más utilizados en la industria del plástico, no tienen contacto directo con el fluido, en este caso el polímero fundido, y tienden a registrar la temperatura del barril en vez de la temperatura de proceso.

## 8. Referencias

- [1] “Acoplásticos”, [https://www.acoplasticos.org/acoplasticos2/index.php?option=com\\_content&view=article&id=32&Itemid=67](https://www.acoplasticos.org/acoplasticos2/index.php?option=com_content&view=article&id=32&Itemid=67), 2007.
- [2] RECIPE, “Reduced Energy Consumption”, Plastic Engineering, in <http://www.eurecipe.com>, 2007.

- [3] G. Cruz, R. Mira, “Viabilidad de la conversión a gas en extrusión de plásticos”, Memorias III Congreso de Inteligencia Computacional, Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, pp. 64-66, Sept. 2012.
- [4] M. Adelt, J. Arthkamp, and H. Selbert, “Method and device for heating a plasticizing cylinder”, Patente para union Europea y Japón n° EP 1 300 233 A1, Abril 9, 2003.
- [5] J. Lebaudy, M. Siter, J. Grenet, and C. Vautier, “Temperature distribution in polyethylene terephthalate plate undergoing heat treatment”, *Polymer*, vol. 36, n° 6, pp. 1217-221, 1995.
- [6] T. Womer, S. Walter, and R. Wheeler, “Comparison of two different cooling methods for extrusion processes”, *Antec*, pp. 796-799, 2006.
- [7] J. Wortberg, M. Bussmann, “An alternative plastification system based on natural gas”, *Journal of Plastic Technology*, vol. 6, n°2, pp. 92-111, 2010.
- [8] Arthkamp, J., “Natural gas in Plastic Processing”, in *Kunststoffe*, n° 10, pp. 89-93, 2003.
- [9] G. Cruz-Riaño, B. Herrera, and J. A. Valencia, “Simulación de un quemador a gas en estado estacionario para extrusión de plástico”, I Encuentro de Tecnología e Ingeniería and IX Simposio Internacional en Energías, Universidad de Medellín, Medellín, 31 de octubre al 1° de noviembre, inédito.
- [10] G. Cruz-Riaño and B. Herrera. “Volúmenes finitos aplicados en la conversión a gas para calentamiento de polímeros”, in Memorias V Congreso Internacional de Formación y Modelación en Ciencias Básicas, Universidad de Medellín, pp. 235-236, mayo 2013.
- [11] Harper, C., “Handbook of Plastic Processes”, New Jersey, USA, Wiley & Sons, pp. 11-12, 2006.
- [12] Noriega, M. & Estrada, O., Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico y el Caucho, in <http://www.icipc.org>. 2009.
- [13] “Xaloy”, in <http://www.xaloy.com>, 2008.
- [14] S. Derezinski, “Heat transfer coefficients in extruder melt sections”, *Antec*, pp. 417-421, 1996.
- [15] S. Derezinski, “Calculating Power of Extruder Melt Sections”, *Antec*, p. 8., 1997.
- [16] C. Rauwendaal, & G. Ponzelli, “Temperature development in Screw Extruders”, *Antec*, p. 16, 2003.
- [17] Z. Tadmor, I. Duvdevani, and I. Klein, *Engineering Principles of Plasticating Extrusion*. *Eng. Sci*, vol. 6, n°185, pp. 202-222, 1966.

- [18] Rauwendaal Extrusion Engineering, Inc, Rauwendaal, in <http://www.rauwendaal.com>, 2008.
- [19] M. Noriega, A. Naranjo, T. Osswald, and N. Ferrier, Patente en requerimiento, expediente 3 12620, Colombia, 2008.
- [20] M. Noriega, A. Naranjo, T. Osswald, and N. Ferrier, "Comparison of the melting behavior of HDPE y PP in single screw extruder", *Antec*, p. 8, 2011.
- [21] C. Rauwendaal, "Polimer Extrusion". München: Carl Hanser Verlag, pp. 268., 2001.
- [22] K. Wilczyński, "SSEM: a computer model for a polymer single screw extrusion", *Journals of materials processing Technology*, n° 109, pp. 308-313, 2001.
- [23] D. Wei, and H. Luo, "Finite elements solutions of heat transfer in molten polymer flow in tubes with viscous dissipation", *International Journal of heat and Mass Transfer*, n° 46, pp. 3097-3108, 2003.
- [24] H. Shokouhmand, and M. Soleimani, "The effect of viscous dissipation on temperature profile of a power - law fluid flow over a moving surface with arbitrary injection/suction", *Energy Conversion and Management*, pp. 171-179, 2011.
- [25] S. Vaddiraju, et al., "Extrusion Die Design Optimization Including Viscoelastic Polymer Simulation", *Antec*, p. 29., 2004.
- [26] Y. Combeaud and B. Vergnes, "Experimental study of the volume defects in polystyrene extrusion", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, n° 121, pp. 175-185, 2004.
- [27] R. Assadi, and X. Colin, "Irreversible structural changes during PET recycling by extrusión", *Polymer*, n° 45, pp. 4403-4412, 2004.
- [28] H. Da Costa, V. Ramos, and C. Rocha, "Rheological properties of polypropilene during multiple extrusión", *Polymer Testing*, n° 24, pp. 86-93, 2005.
- [29] C. Martyn, C. Nakason, and P. Coates, "Stress measurements for contracton flows of viscoelastic polymer melts", *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, n° 91, pp. 123-142, 2000.
- [30] P. Bariani, M. Salvador, and G. Lucchetta, "Development of a test for the rheological characterization of polymers under the injection molding process conditions", *Journal of Material Processing Technology*, n° 191, pp. 119-122, 2007.
- [31] Z. Chen, P. Chao, and S. Chiu, "Proposal of an empirical viscosity model for cuality control in the polymer extrusion process", *Polymer Testing*, n°22, pp. 601-607, 2003.
- [32] D. Baird, "First normal stress difference measurements for polymer melts at high shear rates in a slit die using hole and exit pressure data", *J. Non - Newtonian Fuid Mech.*, n° 148, pp. 13-23, 2008.

- [33] J. Liang, "The elastic behavior during capillary extrusion of LDPE/LLDPE", *Polymer Testing*, n° 21, pp. 69-74, 2002.
- [34] J. Musil, and M. Zatloucal, "Experimental investigation of flow induced molecular weight fractionation during extrusion of HDPE polymer melts", *Chemical Engineering Science*, n°66, pp. 4814-4823, 2001.
- [35] F. Predivi, M. Savaresi, and A. Paranotto, "Design of a feedback control system for real time control of flow in a single - screw extruder", *Control Engineering Practice*, n° 14, pp. 345-355, 2006.
- [36] C. Pujos, N. Regnier, and G. Defaye, "Determination of the inlet temperature profile of an extrusion die in unsteady flow", *Chemical Engineering and Processing*, pp. 456-462, 2008.
- [37] TREFLE, in <http://www.trefle.u-bordeaux1.fr/aquilón>, 2005.
- [38] A. Parwani, T. Prabal, and P. Subbarao, "Estimation of inlet temperature of a developing fluid flow in a parall plate chanel", *International Journal of Thermal Sciences*, n° 57, pp. 126-134, 2012.
- [39] Z. Tadmor, S. Lipshitz, and R. Lavie, "Dynamic model of a plasticating extruder", *Polym. Eng. Sci.*, vol. 14, n° 2, pp. 112-119, 1974.
- [40] L. Tan, A. Lofti, E. Lai & J. Hull, "Soft computing applications in dynamic model identification of polymer extrusion process", *Applied soft computing*, 4, pp. 345-355, 2004.
- [41] C. Abeykoon, et al., "A new model based approach for the prediction and optimisation of thermal homogeneity in single screw extrusion", *Control Engineering Practice*, n°19, pp. 862-874, 2011.
- [42] K. Yao, F. Gao, and F. Allgöwer, "Barrel temperature control during operation transition in injection molding", *Control Engineering Practice*, pp. 1259-1264, 2008.
- [43] C. Abeykoon, P. Martin, A. Kelly & E. Brown, "A rewiw and evaluation of melt temperature sensors for polymer extrusion", *Sensor and Actuators A*, p. 12., 2012.
- [44] J. Sorroche y otros, "Thermal optimisation of Polymer Extrusion using In-process Monitoring Techniques", *Applied Thermal Engineering*, p. 42., 2012.
- [45] X. Shen, R. Malloy and J. Pacini, "An experimental evaluation of melt temperature sensors for termoplastic extrusion", *Antec*, pp. 918-926, 1992.
- [46] K. Sabota, D. Lawson, and J. Huizinga, "Advanced temperature measurements in polymer extrusion", *Antec*, pp. 2832-2842, 1995.

- [47] I. Bruker, C. Miaw, A. Hasson and G. Balch, "Numerical analysis of the temperature profile in the melt conveying section of a single screw extruder", *Polym. Eng. Sci.*, pp. 504-509, 1987.
- [48] E. Brown, A. Kelly and P. Coates, "Melt temperature field measurement in single screw extrusion using thermocouple meshes", *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 75, n° 11, pp. 4742-4748, 2004.
- [49] A. Kelly, E. Brown, K. Howell, and P. Coates, "Melt temperature field measurement in extrusion using thermocouple meshes", *Plast. Rubb. Comp.*, n° 37, pp. 151-157, 2008.
- [50] A. Bendada and M. Lamontagne, "A new infrared pyrometer for polymer temperature measurement during extrusion molding", *Infrared Phys. Technol.*, n° 46, pp. 11-15, 2004.
- [51] E. Brown, P. Olley and P. Coates, "In line melt temperature measurement during real time ultrasound monitoring of single screw extrusion", *Plast. Rubb. Comp.*, n° 29, pp. 3-13, 2000.
- [52] A. Bur et al., "Temperature gradients in the channels of a single extruder", *Polym. Eng. Sci.*, vol. 44, n°11, pp. 2148-2157, 2004.