

**DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN MODELO PARA EL CONTROL DE
TEMPERATURA DE UN PROTOTIPO DE QUEMADOR A GAS PARA
EXTRUSIÓN DE POLIETILENO Y POLIPROPILENO**

EDGAR ARTURO RENDÓN PALACIO

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO – IUPB

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA

MEDELLÍN

2013

**DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN MODELO PARA EL CONTROL DE
TEMPERATURA DE UN PROTOTIPO DE QUEMADOR A GAS PARA
EXTRUSIÓN DE POLIETILENO Y POLIPROPILENO.**

EDGAR ARTURO RENDÓN PALACIO

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electricista

Asesor

MCs MARIO ROBERTO ARRIETA PATERNINA

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO – IUPB

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA DE ELÉCTRICA

MEDELLÍN

2013

Nota de aceptación

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Medellín, 10 de Junio de 2013

RESUMEN

En este trabajo de investigación se describe el proceso de extrusión de polietileno y polipropileno, luego de haber realizado los referentes teóricos pertinentes, se plantea desarrollar y evaluar un modelo predictivo del control de temperatura de un quemador a gas que sea competitivo, Identificar expresiones para la temperatura de proceso del polímero y para los coeficientes de transferencia de calor entre el barril de extrusión y el quemador, además simular el programa utilizando herramientas computacionales. Por otro lado se plantea construir y poner en marcha el prototipo del quemador a gas en una extrusora para Poliolefinas, y evaluar experimentalmente la validez del modelo respecto a coeficientes de transferencia de calor del sistema quemador - extrusora, temperatura del polímero extruido y ahorro energético respecto a resistencias eléctricas. Todo lo anterior se plantea para lograr ahorro energético en la conversión a gas de la unidad de calentamiento en plastificación, lo cual justifica el estudio del control de temperatura de estos sistemas ya que el perfil de temperatura del barril influye notablemente en la temperatura de plastificación y esta a su vez en la calidad del producto extruido

Palabras claves: Modelo predictivo, quemador a gas, polietileno y polipropileno, transferencia de calor, herramientas computacionales, control de temperatura.

ABSTRACT

This research describes the process of extrusion of polythene and polypropylene, after making the relevant theoretical framework, arises develop and evaluate a model predictive temperature control of gas burner that is competitive, identifying expressions to the process temperature of the polymer and the heat transfer coefficients between the extruder barrel and the burner, and simulate the program using computational tools. On the other hand are plans build and implement the prototype gas burner in an extruder for polyolefins, and experimentally evaluate the validity of the model with respect to heat transfer coefficients burner system-extruder, polymer temperature and energy saving compared electrical resistances. All this is proposed to achieve energy savings in the conversion to gas heating unit in plasticizing, which justifies the study of temperature control of these systems as the barrel temperature profile greatly influences the plasticizing temperature and this in turn the quality of the extruded product

Keywords: Predictive Model, gas burner, polythene and polypropylene, heat transfer, computational tools, temperature control.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	4
INTRODUCCIÓN	9
1. EI PROBLEMA	10
2. JUSTIFICACIÓN	12
3. OBJETIVOS	13
3.1 OBJETIVO GENERAL	13
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
4. REFERENTES TEÓRICOS	14
4.1 Calentamiento a gas del barril de extrusión	14
4.2 Otros sistemas de calentamiento del barril del extrusión	16
4.3 Modelamiento y simulación de perfiles de temperatura en plastificación	17
4.4 Control de temperatura en plastificación	20
4.5 Influencia de la temperatura de plastificación en el producto extruido.	21
5. METODOLOGÍA	23
6. RESULTADOS	26
CONCLUSIONES	28
BIBLIOGRAFÍA	30
ANEXOS	33

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Capacidades de calentamiento de resistencias eléctricas convencionales. Adaptado de (Harper, 2006)	16
Tabla 2. Metodología.	23

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Balance de Energía en una extrusora. Adaptado de NPE/ANTEC 2009	10
Figura 2. Plano del dispositivo de calentamiento a gas del barril de plastificación patentado por WEMA/ Ruhrgas AG. (Adelt & et al, 2003)	15
Figura 3. Plastificación de la cama de sólido. Adaptado de (Rauwendaal, 2001)	17

INTRODUCCIÓN

En la industria del plástico para Medellín y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá se ha comenzado a observar la conversión a gas de las unidades de plastificación, mediante el uso de quemadores tipo flauta. Pero estas iniciativas no se han masificado por la dificultad en el control de temperatura de proceso, la cual influye de manera determinante en la calidad del producto. Es por esto que la presente propuesta de investigación pretende construir un prototipo de quemador a gas y desarrollar un control de temperatura que permita variaciones inferiores a 10°C y ahorro en el costo energético superior a 30% comparado con las resistencias eléctricas convencionales, este ahorro en el costo energético es razonable de acuerdo a valores obtenidos en prototipos desarrollados en Alemania. Para lograr lo anterior se deberá inicialmente obtener un modelo matemático que permita describir el comportamiento del sistema (modelo predictivo).

Por lo tanto se utilizará una metodología que nos permita determinar los coeficientes de transferencia de calor, expresiones para la temperatura que permitan hacer control y medición en tiempo real de la temperatura de proceso, cálculo y simulación del quemador a gas con el herramientas computacionales y finalmente; construcción, puesta en marcha y evaluación del prototipo en una extrusora para el procesamiento de polietileno (PE) y polipropileno (PP).

La realización de este proyecto de investigación se da por el apoyo del grupo de Investigación e Innovación en Energía – GiiEN de la Institución Universitaria Pascual Bravo – IUPB; y además por el soporte económico que brinda la institución.

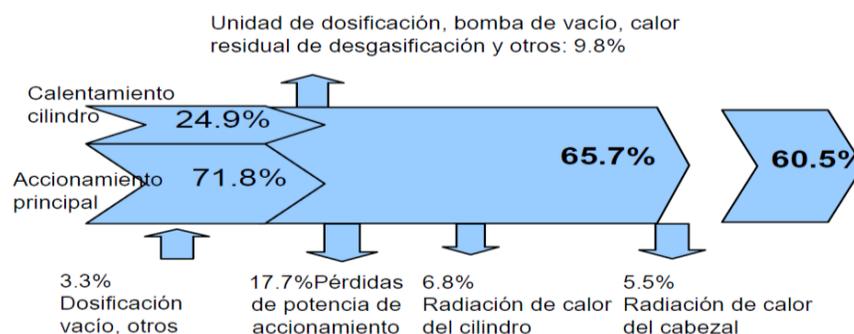
1. EL PROBLEMA

En la industria del plástico el costo energético representa un porcentaje considerable dentro de las utilidades y la reducción de ese costo es un factor importante en la viabilidad y la disminución del impacto ambiental en este tipo de industria.

Los países europeos son líderes mundiales en la iniciativa del ahorro energético en el procesamiento del plástico: RECIPE (Reduced Energy Consumption in Plastics), llevando a cabo una encuesta que inició en 2005 y finalizó en 2007 cuyos resultados permitieron estimar que una reducción del consumo de energía en la industria del plástico del 10% permitiría una reducción anual de 3 millones de toneladas de emisiones de CO₂. También es importante resaltar de RECIPE para este proyecto, que aproximadamente el 70% de los productos termoplásticos son procesados mediante extrusión.

En las memorias de ANTEC, 2009, se ha estimado que de la energía consumida por los equipos de procesamiento cerca del 70% es para el motor principal y el 30% para el calentamiento del barril. Pero las pérdidas ocasionadas en el sistema de accionamiento son cerca del 20% y con tendencia a disminuir notablemente mientras que las pérdidas en el sistema de calentamiento pueden llegar al 70% y es aquí donde se tiene una oportunidad de ahorro energético con la alternativa de calentamiento a gas. Ver figura 1.

Figura 1. Balance de Energía en una extrusora. Adaptado de NPE/ANTEC 2009



Fuente: NPE/ANTEC 2009

En España el 100% de la energía consumida para el procesamiento del plástico es

como energía eléctrica mientras que en el Reino Unido el 70% es como energía eléctrica y el 30% es a gas natural. (European Best Practice Guide, 2006). El consumo de energía eléctrica ascendió a 1.621,7 millones de kilovatios-hora, equivalente al 11,2% de la energía utilizada por la industria manufacturera colombiana. Acoplásticos, 2007.

La importancia del consumo de energía eléctrica en el sector del plástico ha incentivado la realización de convenios de negociación de las empresas del sector con las empresas que suministran energía, por ejemplo en 2011, se realizó un convenio de 30 millones de Kwh/mes para un consumo promedio de 52 empresas afiliadas a Acoplásticos.

El panorama que muestra el país es una motivación para el desarrollo de este proyecto que pretende disminuir el costo energético y el impacto ambiental en la industria del plástico en Medellín y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

2. JUSTIFICACIÓN

Teniendo en cuenta la creciente y acelerada evolución de las empresas, el aumento del consumo de los productos, y que estos aumentos impactan directamente en los procesos productivos, ya que de alguna forma representa también un aumento en la fabricación de los procesos productivos.

Las industrias del plástico no son ajenas a este comportamiento, y máxime que los procesos actuales no son altamente refinados ya que no cuentan con técnicas que permitan un mejor rendimiento. Dado que el control de temperatura del proceso no garantiza un funcionamiento óptimo, lo cual influye directamente en la calidad del producto.

En el área metropolitana se han observado algunas técnicas para el proceso productivo del plástico. Según los estudios realizados, y de alguna manera se han empezado a implementar. La conversión a gas mediante el uso de quemadores tipo flauta es una de éstas técnicas, y aunque esta técnica sigue siendo de igual cuidado, en cuanto que al control de temperatura se refiere, se convierte en objeto de estudio para esta tesis de maestría, ya que se pretende construir un prototipo de quemador a gas y desarrollar un control de temperatura que permita variaciones inferiores a 10°C y ahorro en el costo energético superior a 30% comparado con las resistencias eléctricas convencionales.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar y evaluar un modelo predictivo del control de temperatura de un quemador a gas que sea competitivo en ahorro energético y calidad del polímero extruido (PE y PP) frente a las resistencias eléctricas convencionales.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Identificar expresiones para la temperatura de proceso del polímero y para los coeficientes de transferencia de calor entre el barril de extrusión y el quemador y entre este y el medio exterior, que permitan realizar control predictivo de la temperatura de proceso en tiempo real.

Simular en el programa computacional Ansys - Fluent el perfil de temperatura de la cámara de combustión variando el diámetro de los inyectores y la separación entre estos.

Construir y poner en marcha el prototipo del quemador a gas en una extrusora para poliolefinas.

Evaluar experimentalmente la validez del modelo respecto a coeficientes de transferencia de calor del sistema quemador - extrusora, temperatura del polímero extruido y ahorro energético respecto a resistencias eléctricas.

4. REFERENTES TEÓRICOS

4.1 CALENTAMIENTO A GAS DEL BARRIL DE EXTRUSIÓN

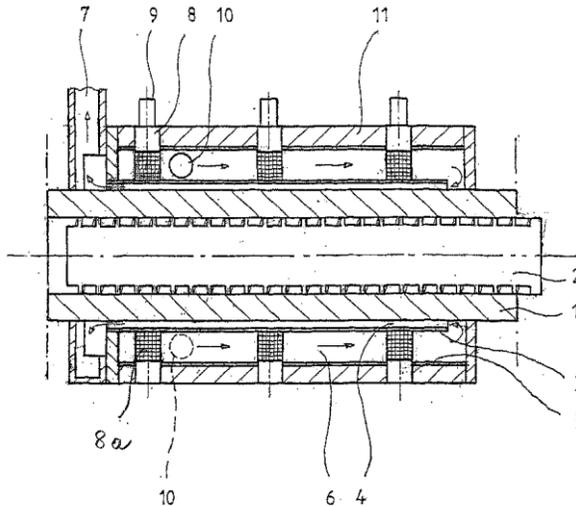
Recientemente (Wortberg, & Bussman, 2010) resaltan la importancia de retomar la modelación experimental del calentamiento a gas en extrusión, mostrando la disminución de consumo energético, tomando como base 1 kwh consumido en producción ambos sistemas generan las mismas pérdidas por disipación en el 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.

Los autores proponen un prototipo acoplado a un barril de extrusión con un tornillo de extrusión de 25 mm y una relación largo – diámetro (L/D) igual a 8. En este prototipo se aprovechan los gases de combustión para precalentar el polímero granulado.

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 (Arthkamp, 2003) muestra las ventajas de la utilización del gas en la industria del plástico y enuncia los aspectos que se deben tener en cuenta para utilizar un quemador a gas en extrusión. (Adelt et al., 2003) desarrollaron una patente del método y dispositivo para calentamiento de un barril de plastificación.

Como muestra la figura 2, el gas entra por la conexión (9), la combustión se da en el quemador (8) y la llama pasa por las boquillas 8a, los gases de combustión pasan a través del espacio anular exterior (6) e interior (4) de los tubos interior (3) y exterior (5), saliendo finalmente por el ducto (7). Esto hace que el barril de plastificación se caliente por convección y radiación. Se evita el sobrecalentamiento del barril (1) y el tornillo (2) mediante la entrada de aire forzado por un ventilador a través de los ductos (10).

Figura 2. Plano del dispositivo de calentamiento a gas del barril de plastificación patentado por WEMA/ Ruhrgas AG. (Adelt & et al, 2003)



Fuente: WEMA/Ruhrigas AG. (Adelt & et al, 2003)

De acuerdo a los cálculos de la Universidad de Duisburg- Essen, en una extrusora con capacidad nominal para calentamiento de 80 KW y con un porcentaje de utilización de 50% se puede tener un ahorro en el costo energético anual de 5000 euros.

Este autor destaca el desarrollo obtenido por la empresa Ruhrgas de Alemania, el cual consiste en una planta piloto a gas para aplicaciones donde la temperatura se pueda ajustar con una precisión de ± 0.3 °C, pero considera que esta aplicación no requiere un dispositivo tan costoso y que este costo se puede minimizar enfriando con aire.

En el ámbito académico esta innovación fue propuesta por la Universidad Duisburg- Essen con el soporte experimental de Ruhrgas y Wema en ANTEC 2003 (Wotberg, & Schroer, 2003) con una investigación experimental cuyo prototipo de unidad de calentamiento-enfriamiento está acoplado a un barril pero no a un proceso de extrusión propiamente dicho. Obtuvieron con una eficiencia de combustión de 80%, una disminución en el costo energético de 60% y de emisión de CO₂ de 55%. Los autores sugieren recuperar el calor de los gases de combustión para utilizarlo en el precalentamiento del plástico granulado.

De acuerdo a la Asociación de Economía de Potencia y Energía Industrial (VIK) 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 alemanas conformaran un equipo para sacar adelante 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.

(Bürkle et al, 2007) obtuvieron una disminución del 58% en el costo energético y en la emisiones de dióxido de carbono en un prototipo implementado en una inyectora.

4.2 OTROS SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DEL BARRIL DEL EXTRUSIÓN

La forma como actualmente se realiza el calentamiento del barril de extrusión es mediante resistencias eléctricas, (Harper, 2006). Hay diferentes tipos entre las cuales están las tubulares, tipo cartucho y tipo banda. Ver tabla 1.

Tabla 1. Capacidades de calentamiento de resistencias eléctricas convencionales. Adaptado de (Harper, 2006)

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

Fuente: (Harper, 2006)

El calentamiento del barril por inducción es una alternativa a las resistencias eléctricas convencionales. El principio de funcionamiento del calentamiento por inducción consiste en la generación de un campo magnético en el sistema mediante el suministro de potencia de alta frecuencia en una bobina helicoidal de

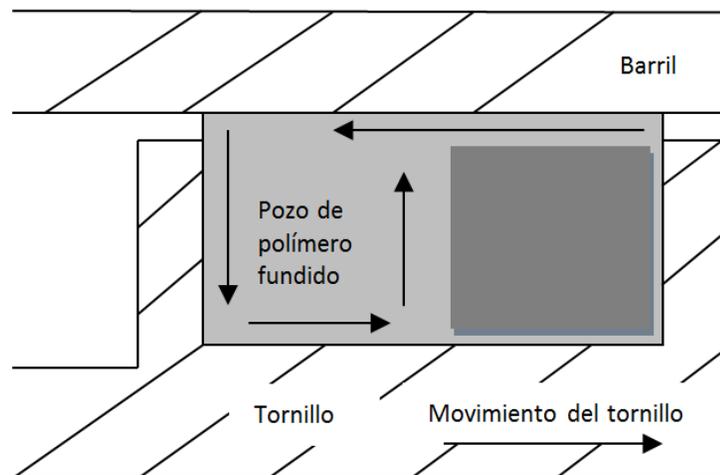
inducción la cual genera un flujo de electrones en el barril metálico de esta forma es como el barril se calienta. Se interpone una capa de aislante térmico entre la bobina y el barril para evitar pérdidas por radiación y convección con el ambiente de tal forma que la bobina se mantiene fría. (Noriega, & Estrada, 2009)

La reducción de costos energéticos mediante la utilización de calentamiento del barril por inducción de alta frecuencia depende del diseño del tornillo, del tipo de material y varía en cada zona del tornillo pero en promedio se obtienen ahorros cercanos al 60% del consumo energético con un control de temperatura más cercano al punto de ajuste que el que se puede obtener con resistencias eléctricas. (Taylor et al, 2008)

4.3 MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE PERFILES DE TEMPERATURA EN PLASTIFICACIÓN

(Tadmor et al, 1966) son los pioneros en el análisis matemático del proceso de plastificación. Diferencian dos zonas dentro del canal de extrusión: la cama del sólido y el pozo de polímero fundido. Ver figura 3.

Figura 3. Plastificación de la cama de sólido. Adaptado de (Rauwendaal, 2001)



Fuente: (Rauwendaal, 2001)

Plantean la ecuación de balance de energía con los siguientes supuestos: estado

estacionario, conductividad y densidad del polímero fundido constantes, transferencia de calor por convección despreciable, transferencia del calor por conducción únicamente en dirección normal, flujo laminar para el polímero fundido, fuerzas de inercia y otras fuerzas de los cuerpos despreciables, no hay deslizamiento en las paredes, no hay diferencias de presión en la película fundida, la dependencia de la temperatura y la viscosidad es despreciable.

A partir de esto obtienen las correlaciones básicas entre la velocidad de plastificación del polímero sólido y la temperatura. Partiendo de este modelo teórico los siguientes autores han trabajado en obtener perfiles de temperatura mediante métodos numéricos, programas computacionales y soluciones analíticas cada uno con supuestos y limitaciones.

Sastrohartorno, et al, (1995) realizan simulaciones numéricas en dos y tres dimensiones y estudios experimentales con LPDE como fluido no Newtoniano Y Viscasil como fluido Newtoniano. Se obtienen resultados de simulación en tres dimensiones más ajustados a los resultados experimentales que los obtenidos con simulación en dos dimensiones. Obtienen perfiles de temperatura, velocidad, presión y esfuerzo cortante a lo largo del tornillo y de temperatura, velocidad, presión en el dado de extrusión para diferentes RPM del husillo. Las fronteras del barril y el dado se consideran isothermas por etapas y la frontera del tornillo adiabática.

Sirjala, (1997) realizó un trabajo similar pero sin estudio experimental. De este trabajo es importante resaltar que trabaja con varias relaciones de aspecto $\alpha = 0.5, 0.3, 0.2$ y 0.1 ; con este último valor obtuvieron buenos resultados con pocas iteraciones.

Lin, & Jaluria, (1997) abordaron la modelación de la extrusión de fluidos no newtonianos desde el transporte térmico conjugado, solucionando las ecuaciones con métodos de elementos finitos en dos dimensiones. Validan los resultados obtenidos en la simulación de la extrusión de Viscasil -300M con los resultados experimentales obtenidos por (Overaker, & Sernas, 1995) y (Sernas et al, 1996) para harina de maíz. Estos resultados al ser confrontados con los obtenidos por (Chiruvella et al, 1995,1996) fueron bastante similares. Estudiaron los efectos conjugados de: la transferencia de calor axial en el barril y el flujo de calor convectivo de la superficie interna del barril, la transferencia de calor en el cuerpo del tornillo, la variación de la temperatura externa al tornillo y la variación de la temperatura promedio del fluido. Consideran que el efecto de conducción de calor del tornillo no es despreciable pero que es más significativa la conducción de calor en el barril para analizar las secciones de calentamiento.

(Derezinski, 1996) obtiene mediante simulación con métodos numéricos valores para el coeficiente de transferencia de calor entre el tornillo y el barril para diferentes valores de rpm del husillo y de juego radial entre el tornillo y el barril.

(Manab, & Ghoshdastidar, 2001) tuvieron en cuenta el efecto de convección transversal, es decir la convección normal al labio del tornillo y a la base del canal de extrusión, para esto deben solucionar el modelo utilizando volúmenes de control en dos direcciones es por esto que le llaman cuasi tridimensional. Las ecuaciones las solucionan con el método de volúmenes finitos. Obtienen perfiles de temperatura y presión en la superficie del tornillo y valores de temperatura de entrada al dado de extrusión. Los valores obtenidos de perfiles de temperatura y presión son comparados con los valores experimentales obtenidos por (Palit, 1974).

(Wilczyński, 2001) presenta un modelo computacional SSEM (Single Screw Extrusion Model) desarrollado para diferentes geometrías de tornillo y dado. Realizaron validación experimental, dicen que el modelo puede predecir flujo másico, perfiles de temperatura y presión, pero solamente se presentan los resultados obtenidos de presión. El modelo no utiliza elementos finitos sino el cálculo de algoritmos en Turbo Pascal.

(Rauwendaal, & Ponzielli, 2003) obtienen una expresión analítica para la temperatura del polímero fundido en una extrusora de tornillo simple en función de coeficientes que dependen de la geometría del tornillo, la velocidad del husillo, el calor específico, el flujo másico del polímero fundido, la conductividad del barril y la diferencia de temperaturas entre el barril y el polímero fundido.

Compararon los resultados obtenidos con el programa de simulación Compuplast Flow 2000 para LPDE en una extrusora con diámetro de tornillo de 60 mm y relación L/D de 10 y variando las rpm hasta 100. Concluyeron que la expresión es válida solo para bajas rpm y haciendo una corrección en la que se tenga en cuenta la transferencia calor a través del barril, es decir que no se considere el barril como frontera adiabática. También obtienen una ecuación para hacer esta corrección.

(Vaddiraju et al, 2004) realizan una simulación del proceso de extrusión mediante Polyflow de ANSYS y la validación experimental la desarrollan en una extrusora de 40 mm de diámetro de tornillo y longitud de 1.36 m. Hacen sugerencias del dimensionamiento de la malla y de las condiciones de frontera y concluyen que el exponente de la ley de viscosidad de Carreau- Yasuda tiene una influencia bastante significativa en la simulación. Recomiendan 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.

4.4 CONTROL DE TEMPERATURA EN PLASTIFICACIÓN

Una iniciativa conjunta de Promoplast, la Universidad de Bérgamo, el Politécnico de Milán y el Centro Europeo para el Desarrollo de Aplicaciones del Plástico(CESAP) tuvo como resultado (Predivi et al, 2006) 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 y control de temperatura y presión de salida en la extrusora.

Obtienen la función de transferencia para el calentamiento del barril con resistencia eléctrica y control PID y para la temperatura de salida también con control PID. El sistema de control convencional, sin retroalimentación tiene variaciones de 5% en la regulación de la temperatura, mientras que el sistema de control propuesto es más cercano al punto de ajuste. Realizaron validación experimental para polipropileno virgen y remolido y para polietileno y poliestireno.

Con este sistema de control con retroalimentación se obtiene una mejor regulación porque tiene una rápida reacción a los cambios en las condiciones de operación y corrige en forma efectiva las perturbaciones por los cambios inesperados en la calidad del material.

(Tadmor et al, 1974) obtienen las ecuaciones diferenciales respecto al tiempo de la velocidad de transformación del sólido en polímero fundido y de la temperatura de este último.

Dada la complejidad de la solución determinística de las ecuaciones dinámicas que gobiernan el transporte de masa y energía necesarias para obtener un solución analítica para la temperatura del polímero fundido en el proceso de extrusión (Tan et al,2004), proponen estudiar las solución de estas ecuaciones 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 datos desconocidos pero que se pueden obtener en forma estadística; permitiendo que el modelo aprenda a mejorarse a sí mismo con algoritmos usados en reglas de lógica difusa y genética. Es una forma inteligente de iterar que permite utilizar un programa computacional liviano apto para hacer control en tiempo real; con un buen grado de precisión, adaptándose a perturbaciones como el cambio en el material a procesar, la variación en la temperatura del barril, las rpm del husillo o la presión de plastificación.

4.5 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE PLASTIFICACIÓN EN EL PRODUCTO EXTRUIDO

(Combeaud et al, 2004) concluyen de su estudio experimental que los defectos volumétricos son muy sensibles a la temperatura del polímero fundido y a la geometría relacionada con la entrada del polímero al dado de extrusión. El comienzo de los defectos es apreciable con variaciones de temperatura de 10°C.

(Assadi et al, 2004) consideran que los cambios estructurales irreversibles durante la extrusión de PET reciclado están relacionados con el proceso de oxidación de las cadenas, 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.

(Da Costa et al, 2005) 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. Coinciden con los autores anteriores en que las altas temperaturas y la poca homogeneidad del perfil de temperaturas influyen de manera significativa en este fenómeno.

Existe la percepción en el gremio del plástico acerca de la dificultad para controlar la temperatura del polímero con quemadores a gas, localmente se observa su utilización en empresas que no requieren buena calidad en el producto pero que la necesidad de ahorrar costos energéticos las ha motivado a su utilización. Si bien hay una justificación clara para la conversión a gas de los sistemas de calentamiento en las unidades de plastificación de polímeros sustentada en el ahorro energético no hay estudios sobre el control de temperatura necesario para la implementación de esta conversión.

De acuerdo a la revisión realizada, la forma como se defina la temperatura del barril tiene gran influencia en la predicción de la temperatura del polímero fundido y esta a su vez es un factor determinante en la calidad del producto extruido. Es por esto que se requiere determinar mediante simulación con Ansys- Fluent el perfil de temperaturas para un quemador a gas que permita desarrollar un control de temperatura para esta aplicación.

Existe una patente para la unidad de calentamiento y enfriamiento a gas del barril de extrusión pero no se especifica el control de temperatura. En la literatura científica los estudios existentes sobre control de temperatura en extrusión se refieren a calentamiento con resistencia eléctrica, es por esto que se necesita

desarrollar un control de temperatura que permita disminuir el costo energético en la industria de Medellín y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá manteniendo estándares de calidad en el polímero extruido.

5. METODOLOGÍA

La hipótesis propuesta es realizar un control de temperatura para la conversión del sistema de calentamiento a gas de las extrusoras convencionales que permita obtener ahorro en el costo energético de 30% en el proceso de extrusión de polietileno (PE) y polipropileno (PP) para la pequeña y mediana industria de Medellín y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, con variaciones de temperatura del polímero en proceso de extrusión a 10 °C.

En la siguiente tabla se presenta la metodología planteada para validar la anterior hipótesis.

Tabla 2. Metodología.

OBJETIVO		ACTIVIDAD
Identificar expresiones para la temperatura de proceso del polímero y los coeficientes de transferencia de calor entre el barril de extrusión y el quemador y entre este y el medio exterior que permitan realizar control predictivo de la temperatura de proceso en tiempo real.		Evaluar el estado del arte de los modelos predictivos de perfiles de temperatura en extrusión de termoplásticos.
		Seleccionar los modelos apropiados para la predicción de temperatura de proceso en la extrusión de polietileno y polipropileno.
PRODUCTO:	Estado del arte de predicción de perfiles de temperatura en extrusión de polímeros. Metodología para el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor y la temperatura de proceso.	Seleccionar los modelos apropiados para predecir el coeficiente de transferencia de calor de la cámara de combustión y el medio exterior.
INDICADOR:	Reporte y publicación	Establecer una metodología para calcular los coeficientes de transferencia de calor.

<p>Simular en Ansys - Fluent el perfil de temperatura de la cámara de combustión variando el diámetro de los inyectores y la separación entre estos.</p>		<p>Dimensionar una cámara de combustión de gas natural para una extrusora de poliolefinas.</p>
<p>PRODUCTO: Simulación en Ansys-Fluent del perfil de temperatura de la cámara de combustión.</p> <p>Planos detallados de la cámara de combustión y planos de montaje del quemador.</p> <p>Metodología de cálculo de la máxima temperatura de proceso del polímero y consumo de energía.</p>		<p>Seleccionar un quemador comercial.</p> <p>Establecer una metodología para obtener el valor de máxima temperatura de proceso del polímero en función del perfil de temperatura de la cámara de combustión.</p>
<p>INDICADOR: Reporte</p>		<p>Calcular el consumo de energía teórico.</p> <p>Simular el perfil de temperatura de la cámara de combustión.</p>
		<p>Establecer una metodología para el control de temperatura de proceso.</p>

OBJETIVO		ACTIVIDAD
<p>Construir y poner en marcha el prototipo del quemador a gas en una extrusora para poliolefinas.</p>		<p>Fabricar la cámara de combustión</p>
<p>PRODUCTO: Prototipo</p>		<p>Realizar el montaje del sistema de calentamiento- enfriamiento del barril de extrusión.</p>
<p>INDICADOR: Reporte</p>		<p>Hacer la puesta a punto del proceso de extrusión de polietileno y polipropileno con el calentamiento a gas.</p>

<p>Evaluar experimentalmente la validez del modelo respecto a coeficientes de transferencia de calor del sistema quemador - extrusora, temperatura del polímero extruido y ahorro energético respecto a resistencias eléctricas y analizar los resultados</p>		Plantear hipótesis estadística sobre la validez de la metodología para el diseño que pueda ser probada a partir de las variables medidas				
		Establecer el procedimiento a seguir para probar las hipótesis planteadas				
		Determinar las variables a medir en el prototipo, el procedimiento de medida y el tamaño de la muestra				
		Medir siguiendo el procedimiento determinado				
		Probar las hipótesis planteadas según el procedimiento establecido				
<table border="1"> <tr> <td>PRODUCTO:</td> <td> <p>Hipótesis estadística</p> <p>Procedimiento de toma de datos y análisis de resultados.</p> <p>Resultados del experimento</p> </td> </tr> <tr> <td>INDICADOR:</td> <td>Reporte y publicación</td> </tr> </table>		PRODUCTO:	<p>Hipótesis estadística</p> <p>Procedimiento de toma de datos y análisis de resultados.</p> <p>Resultados del experimento</p>	INDICADOR:	Reporte y publicación	Analizar y publicar los resultados y las conclusiones
PRODUCTO:	<p>Hipótesis estadística</p> <p>Procedimiento de toma de datos y análisis de resultados.</p> <p>Resultados del experimento</p>					
INDICADOR:	Reporte y publicación					

6. RESULTADOS

Los resultados obtenidos hasta el momento en este trabajo de investigación son:

Ponencia: Diseño de controlador predictivo basado en modelo para el control de temperatura durante el proceso de cocción de mortadela , presentado en el III Congreso internacional de materiales energía y medio ambiente de la Universidad Autónoma del (CIMEM) Caribe (Barranquilla- Colombia) realizado del 2 al 4 de Noviembre del 2011.

Ponencia: Estudio de las funciones y sus graficas utilizando herramientas tecnológicas (MATLAB). Presentado en el IV congreso Internacional de Formación y Modelación en Ciencias Básicas realizado del 9 al 11 de Mayo del 2012.

Ponencia: Identificación de sistemas dinámicos utilizando el Toolbox Ident de Matlab. Presentado en el V congreso Internacional de Formación y Modelación en Ciencias Básicas realizado del 8 al 10 de Mayo del 2013.

Ponencia: Estudio de normas de las normas vectoriales y matriciales usando Matlab. Presentado en el V congreso Internacional de Formación y Modelación en Ciencias Básicas realizado del 9 al 11 de Mayo del 2012

Artículo: Calentamiento a Gas en Extrusión de Poliolefinas. Sometido en revista Ingeniería y Competitividad, el cual hace parte del proyecto de investigación titulado “Desarrollo y evaluación de un modelo para el control de temperatura de un prototipo de quemador a gas para extrusión de polietileno y polipropileno.”, registrado y aprobado por la Dirección Operativa de Investigación (DOI); cuyo investigador principal es la ingeniera Gloria Cruz Riaño, docente e investigadora del grupo GEiiN

Todas estas actividades han sido realizadas con los Investigadores Gloria Cruz Riaño, Mario Roberto Arrieta Paternina y Rafael Mira Pérez. Lo anterior es el resultado del trabajo continuo durante los dos últimos años y con la participación del grupo GiiEN. Para mayor constancia de lo anterior adjunto las evidencias de cada aporte al grupo.

En los anexo se encuentran las evidencias de las actividades desarrolladas, las cuales se han derivado de este trabajo de investigación.

Es de anotar que el trabajo de maestría continúa su desarrollo normal de acuerdo a los objetivos planteados.

CONCLUSIONES

Los sistemas de calentamiento por resistencias eléctricas son menos eficientes que los sistemas de calentamiento a gas, ya que presentan un consumo elevado de potencia eléctrica, y por otro lado no es posible recuperar energía disipada, caso contrario sucede con los quemadores a gas que invierten menos energía en el proceso, y además es posible recuperar aire caliente de la combustión; lo cual implica que para procesos de que trabajan con el plástico se pueden tener una eficiencia en los quemadores a gas de 75% y 85%.

Grandes variaciones de temperatura para cualquier proceso térmico genera dificultades, tanto a nivel económico como en la calidad del producto. Para los procesos extruidos las diferencias de temperatura por fuera de los rangos permisibles (10 °C) generan cambios físico químicos en los polímeros.

En los procesos de calentamiento del plástico no solamente la temperatura es una variable fundamental a controlar. Existen otras variables que son muy importantes y que permiten también se deben considerar. Como es el caso de la velocidad tornillo y sus dimensiones, las propiedades del mismo polímero; las cuales pueden ser determinantes en el comportamiento del perfil de temperatura del polímero fundido.

Los mejores modelos matemáticos que se han obtenido para representar de manera adecuada el comportamiento de los perfiles de temperatura en los polímeros son modelos tipo caja negra (experimentales) mediante métodos numéricos y simulación, o realizando una buena cantidad de mediciones de los perfiles de temperatura, con el fin de obtener los coeficientes de transferencia de calor entre el polímero y el barril.

7. RECOMENDACIONES

Tomando como referencia este trabajo de investigación y la literatura consultada se pueden explorar algunos trabajos que sirvan para complementar o ampliar esta investigación.

Obtener y validar el modelo matemático de características fenomenológicas (modelo caja blanca o caja gris) que pueda representar toda la dinámica del proceso de calentamiento del plástico, esto quiere decir no solamente estudiar el comportamiento de la temperatura en los polímeros si no el comportamiento de los fluidos en el proceso de extrusión.

Implementar técnicas modernas para el control de temperatura del proceso. Como lo es el Controlador Predictivo Basado en Modelo (MPC).

BIBLIOGRAFÍA

- Arthkamp, J., (2003). Natural gas in Plastic Processing. *Kunststoffe*, 10, 89-93.
- Assadi, R., Colin, X., & Verdu, J., (2004). Irreversible structural changes during PET recycling by extrusion. *Polymer*, 45, 4403-4412.
- Bürkle, E., Hungerkamp, T., & Würtele, M., (2007). Plasticizing Systems heated by Natural Gas. *Kunststoffe*, 9, 202-206.
- C. Rauwendaal, (2001), "Polimer Extrusion", Cuarta edición, Carl Hanser Verlag, München
- Chiruvella, R.V, Jaluria, Y., & Essghir, M., & Sernas, V., (1996). Extrusion of non-newtonian fluids in a single-screw extruder with pressure back flow. *Polymer Engineer and Science*. 35 (36), 358-367.
- Chiruvella, R.V, Jaluria, Y., & Karwe, M.V., (1995). Numerical simulation of fluid flow and heat transfer in a single-screw extruder with pressure back flow. *Polymer Engineer and Science*. 35 (3), 261-273.
- Combeaud, Y.D., & Vergnes, B., (2004). Experimental study of the volume defects in polystyrene extrusion. *Journal of Non –Newtonian Fluid Mechanics*, 121, 175-185.
- Da Costa, H.M., Ramos, V.D., & Rocha, C.G, (2005). Rheological properties of polypropilene during multiple extrusión. *Polymer testing*, 24, 86-93.
- Derezinski, S.J, (1996). Heat transfer coefficients in extruder melt sections. *Antec*, 417-421.
- Harper, C.A, (2006). *Handbook of plastic Processes*. 11-12, Wiley & Sons, New Jersey, USA.
- Lin, P., & Jaluria, Y., (1998). Conjugate thermal transport in the channel of an extruder for non-newtonian fluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41, 3239-3253.
- Low energy plastics processing. European best practice guide, (2006).
- Manab, K.D, & Ghoshdastidar, P.S., (2001). Experimental validation of cuasi three-dimensional conjugate heat transfer model for the metering section of a single screw plasticating extruder. *Materials Processing Technology*, 120, 397-411.
- Noriega, M. Instituto Colombiano del Plástico y el Caucho, ICIPC. *Memorias Antec*,

(2009).

Noriega, M., & Estrada, O. Uso eficiente de la energía en el procesamiento de plásticos. Instituto Colombiano del plástico y el Caucho, ICIPC, (2009).

of Materials Processing Technology, 109, 308-313.

Palit, K., (1994). Some experiments on polymer melt flow in plasticating extruder. Polymer Processing research. Report 1. Mechanical Engineering Department, imperial College , UK.

Predivi, F., Savaresi, M., & Paranotto, A., (2006). Design of a feedback control system for real time control of flow in a single- screw extruder. Control Engineering practice, 14, 1111-1121.

Rauwendaal, C., & Ponzielli, G., 2003. Ponencia en ANTEC, Nashville, TN, Abril 8.

Sastrohartono, T., Jaluria, Y., Esseghir, H., & Sernas, V., (1995). A numerical and experimental study of three-dimensional transport in the channel of an extruder for polymeric materials. International Journal Heat Mass Transfer, 38(11), 1957-1973.

Syrjälä, S. (1997). Numerical study of fully developed non-newtonian fluid flow and heat transfer in a rectangular channel with moving wall. International Journal Heat Mass Transfer, 24, (1), 11-25.

Tadmor, Z., Duvdevani, I., & Klein, I., (1966). Engineering Principles of Plasticating Extrusion. Eng.Sci, 6, 185.202-222.

Tadmor, Z., Lipshitz, S.D., & Lavie, R., 1974. Dynamic model of a plasticating extruder. Polym. Eng. Sci., 14, (2), 122 – 119.

Tan, L.P., Lofti, A., Lai, E., & Hull, J.B., 2004. Soft computing applications in dynamic model identification of polymer extrusion process. Applied soft computing, 4, 345-355.

Taylor, T. Womer, & R. Kadykowsky, (2008). Aumentos en la Eficiencia y Mejoras en el control con el uso de diversas Tecnologías para el Calentamiento de los Cilindros en los Procesos de Moldeado por Inyección. Xaloy Corporation, (2008), New Castle, Inglaterra.

Vaddiraju, S.R., Kostic, M., Reifschneider, L., Pla-Dalmau, A., Rykalin, V., & Bross, A., 2004. Ponencia en Antec, Chicago, Mayo 16-20.

Wilczyński, K, (2001). SSEM: a computer model for a polymer single screw extrusion. Journals

Wortberg, J., & Bussmann, M., (2010). An alternative plastification system based on natural gas. *Journal of Plastic Technology*, 6(2), 92-111.

Wortberg, J., & Schroer, S., (2003). Novel Barrel Heating with natural Gas. *Antec*, 98-102.

ANEXOS

DISEÑO DE UN CONTROLADOR PREDICTIVO BASADO EN MODELO PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA DURANTE EL PROCESO DE COCCIÓN DE MORTADELA

M.Sc. Edgar Arturo Rendón Palacio
Investigador Grupo de Investigación e Innovación en Energía – GüEN
Tecnológico Pascual Bravo
Calle 73 No. 73A – 226, Medellín
earpa2000@yahoo.com

M.Sc. Alejandro Marquez Ruiz
Investigador Grupo de Automática de la Universidad Nacional de Colombia - GAUNAL
Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín
Carrera 80 No. 65 - 223, Medellín
alejandro.marquez@ieee.org

M.Sc. Mario Arrieta Paternina
Investigador y Director Grupo de Investigación e Innovación en Energía – GüEN
Tecnológico Pascual Bravo
Calle 73 No. 73A – 226, Medellín
mario.arrieta@pascualbravo.edu.co (Autor Corresponsal)

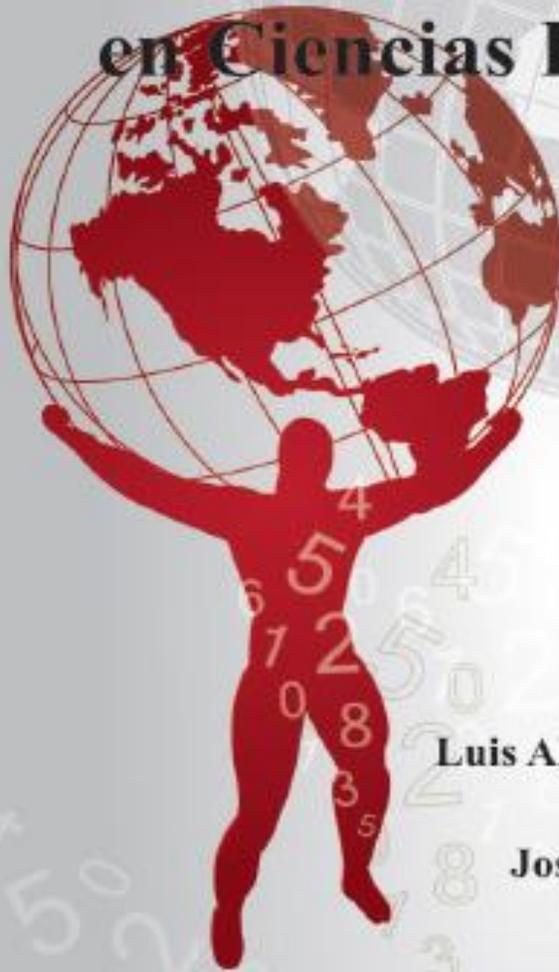
Ph.D. Jairo José Espinosa Oviedo
Investigador Grupo de Automática de la Universidad Nacional de Colombia – GAUNAL
Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín
Carrera 80 No. 65 - 223, Medellín
jairo.espinosa@ieee.org

RESUMEN

En este artículo se plantea un nuevo modelo matemático para el proceso térmico de cocción de mortadela en la industria de alimentos, a partir de un balance de energía; y con base al modelo realizado se propone un nuevo diseño del sistema de control del proceso de cocción, incorporando a este un sistema de Control Predictivo basado en Modelo (más conocido como MPC, por sus siglas del inglés, Model Predictive Control). Para lograr lo anterior, inicialmente se obtiene el modelo matemático del sistema a partir de leyes físicas de la transferencia de calor por convección, se realizan las mediciones de las variables del sistema con tarjeta de adquisición de datos y se estiman los parámetros del modelo por el método de mínimos cuadrados, para luego proceder con la validación del modelo matemático por medio de una validación cruzada (para la validación se tomaron el 20% de los datos de cola del experimento). Luego, se diseña el MPC mediante el uso MPC Toolbox de MATLAB & Simulink y se incorpora al proceso de cocción, con previa sintonización del controlador. Finalmente, se realizan comparaciones de operación entre el sistema de control lineal del proceso actual, el cual es un PID (Controlador Proporcional, Integral y Derivativo), y el sistema MPC, que es de mejor desempeño, obteniéndose un MPC de mejor comportamiento que los PID, además de una notable reducción en el tiempo de cocción y aproximadamente una disminución del 20% de la energía que se invierte en el proceso.

Palabras Claves: Proceso de Cocción de Mortadela, Modelo Matemático y Controlador MPC y PID.

Formación y Modelación en Ciencias Básicas



Luis Albeiro Zabala Jaramillo

José Alberto Rúa Vásquez

Coordinadores académicos



UNIVERSIDAD DE MEDELLIN



CURSILLO
**ESTUDIO DE LAS FUNCIONES Y SUS GRÁFICAS
UTILIZANDO HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS (MATLAB)**

Edgar Arturo Rendón Palacio¹

Jaime Muñoz²

Mario Arrieta Paternina³

CONTEXTO

En algunas ocasiones cuando los estudiantes se enfrentan a expresiones matemáticas, puede ser difícil para ellos lograr entender con facilidad su significado; es por eso que su representación gráfica puede ser influyente para poder entender el fenómeno que describen dichas expresiones. Para facilitar el aprendizaje de muchos modelos matemáticos (expresiones matemáticas) la tecnología ha contribuido con el desarrollo de diferentes herramientas tecnológicas que permiten su estudio de una forma más práctica y ágil. MATLAB se ha convertido en una poderosa herramienta informática, que permite solucionar una gama amplia de contextos matemáticos entre los cuales están las funciones, ya que mediante esta herramienta se puede solucionar y visualizar cualquier representación matemática.

OBJETIVOS

Estudiar las funciones utilizando MATLAB como herramienta informática.

METODOLOGÍA

Desarrollo de los conceptos teóricos de funciones y gráficas utilizando MATLAB.

RESULTADOS

En el presente trabajo un estudio teórico – práctico fue llevado a cabo, a partir del uso de MATLAB como herramienta informática de apoyo para la interpretación gráfica y numérica del dominio y el rango de algunas funciones algebraicas. Se establecieron criterios para calcular con facilidad estas dos importantes características de cualquier función.

CONCLUSIONES

Se realizó la representación gráfica de algunas funciones mediante el uso de MATLAB como herramienta informática de apoyo, con la cual se permitió identificar fácilmente su dominio y su rango.

¹ Universidad de Medellín. E-mail: earendon@udem.edu.co

² Universidad de Medellín. E-mail: jamunoz@udem.edu.comail

³ Tecnológico Pascual Bravo – I.U. E-mail: mario.arrieta@pascualbravo.edu.co

CURSILLO
**ESTUDIO DE LAS NORMAS VECTORIALES
Y MATRICIALES USANDO MATLAB**

Edgar Arturo Rendón Palacio¹

Mario Arrieta Paternina²

Rafael Mira Pérez³

Ismael Rivera Madrid⁴

CONTEXTO

En este trabajo se presenta el análisis teórico-práctico de las normas vectoriales y matriciales más comunes, ejemplificadas a través de ejercicios resueltos y estudiados de forma general con MATLAB, con el objetivo de dar a entender una visión más fácil de los conceptos matemáticos que en la literatura se ofrecen. Partiendo de los preliminares matemáticos y haciendo un recorrido por el análisis del problema, se refleja en los resultados obtenidos la representación de las distintas normas en el espacio tridimensional de forma gráfica.

OBJETIVOS

Estudiar las normas matriciales y vectoriales utilizando MATLAB con el fin de lograr una representación tridimensional (3D) de las Normas 1-uno, 2-Dos e Infinita.

METODOLOGÍA

Desarrollo de los conceptos teóricos que fundamentan las normas vectoriales y matriciales 1- uno, 2-dos e infinita; posteriormente, se realizan los algoritmos para proceder a construir la representación tridimensional (3D) de cada una de ellas.

RESULTADOS

Se plantearon de forma sencilla los conceptos básicos relacionados con normas vectoriales y matriciales y se obtuvo la representación 3D de las normas.

CONCLUSIONES

Es posible dar a conocer por medio de este trabajo una forma sencilla de asimilar el concepto de norma y más específicamente en su representación vectorial y matricial, con la ayuda de MATLAB para la construcción de la representación gráfica.

PALABRAS CLAVE: Norma, vector, matriz, transformación lineal.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

M. R. A. Paternina, Edgar Rendón Palacio, Mira Pérez, R. H. M. Un breve estudio de las normas vectoriales y matriciales usando MATLAB. Tecnológico Pascual Bravo. Grupo de Investigación e Innovación en Energía – GIEN. 2011.

¹ Universidad de Medellín. E-mail: earendon@udem.edu.co

² Tecnológico Pascual Bravo – I.U. E-mail: mario.arrieta@pascualbravo.edu.co

³ Tecnológico Pascual Bravo – I.U. E-mail: rafael.mira@pascualbravo.edu.co

⁴ Tecnológico Pascual Bravo – I.U. E-mail: ismael.rivera@pascualbravo.edu.co

CONGFORMODEL-2013 (author)[Help](#) [Sign out](#)[New Submission](#) [My Submissions](#) [CONGFORMODEL-2013](#) [EasyChair](#)**CONGFORMODEL-2013 Submission 169**[Update information](#)
[Update authors](#)
[Submit a new version](#)
[Withdraw](#)**The submission has been saved!**

If you want to **change any information** about your paper or withdraw it, use links in the upper right corner.

Paper 169	
Title:	IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS DINÁMICOS UTILIZANDO EL TOOLBOX IDENT DE MATLAB
Paper:	Word document
Category:	CURSILLO Identificación. Modelo.
Keywords:	Sistema Dinámico. Experimentación y Validación. Toolbox ident de MATLAB.
Topics:	MATEMÁTICA APLICADA CONTEXTO En gran cantidad de procesos industriales es de gran importancia tener modelos que permitan determinar las condiciones óptimas de un proceso; controlar, automatizar y diagnosticar fallas en un sistema; caracterizar y extraer conocimiento de un proceso. De acuerdo a esta necesidad, se dará a conocer la identificación de sistemas dinámicos mediante el toolbox ident de MATLAB, el cual nos permite determinar un modelo a partir de datos tomados de un proceso real. OBJETIVO Realizar la identificación de un sistema dinámico de un proceso real mediante la determinación de sus parámetros funcionales y estructurales por medio del toolbox ident de MATLAB, con el fin de dar a conocer como se modela un proceso a partir de su experimentación. METODOLOGÍA A partir de datos tomados (mediciones de temperatura, humedad, flujo, corriente, voltaje, potencia, entre otras) de un proceso real, ya sea en experimentación u operación normal; se adquieren datos de entradas y salidas sobre las cuales se construirá el modelo. Luego se procede con la etapa de preparación de datos y la selección adecuada de los conjuntos de experimentación y validación. Para iniciar el proceso de identificación y validación acorde a modelos pre-definidos en el toolbox. Finalmente, se infiere acerca del comportamiento del proceso real. RESULTADOS Para la identificación del sistema dinámico asociado al proceso real se logró interactuar con modelos paramétricos lineales: ARX, ARMAX, Box-Jenkins y Espacio de Estados; y modelos de procesos, espectrales y de correlación. CONCLUSIONES Para todo proceso de identificación de un modelo dinámico es necesario, además de un diseño de experimentos estático, uno dinámico que garantice excitación persistente en todas las dinámicas a identificar. El proceso de identificación realizado con los modelos permite inferir cual es el de mejor aproximación REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Software MATLAB & Simulink The Language Technical Computing. Versión R2012a.
Time:	Apr 3, 13:32 GMT

Authors						
first name	last name	email	country	organization	Web site	corr
Mario	Arrieta Patemina	mario.arrieta@pascualbravo.edu.co	Colombia	Institución Universitaria Pascual	http://www.pascualbravo.edu.co	✓

Anexo A. Artículo

CALENTAMIENTO A GAS EN EXTRUSIÓN DE POLIOLEFINAS

Gloria Cruz-Riaño^{*§}, Edgar. Rendón*

**Grupo de Investigación e Innovación en Energía, INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA
PASCUAL BRAVO.*

**Grupo de Investigación en Materiales Avanzados y Energía, INSTITUTO
TECNOLÓGICO METROPOLITANO.*

§inggloriacr@yahoo.es

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 de calentamiento a gas del barril de extrusión, otros sistemas de calentamiento, modelamiento y simulación de perfiles de temperatura en plastificación, influencia de la temperatura de plastificación en el producto extruído y control de temperatura. Este artículo concluye que el calentamiento a gas es más eficiente que las resistencias eléctricas para plastificación y que el modelo predictivo para el control de temperatura de esta innovación puede ser

desarrollado con el modelo de Carreau-Yasuda y herramientas de computación liviana.

Palabras clave: extrusión de polímeros, gas natural, control de temperatura, ahorro energético.

Abstract:

The gas conversion may allow a reduction in the energy cost of 60% in plastic extrusion processes. This paper presents a review on gas heating of extruder barrel, other heating systems, modeling and simulation of melt temperature profiles, temperature control and influence of the melt temperature in the extruded product. This paper concludes that heating with natural gas is more efficient than electrical resistances for plastication and that the predictive model for temperature control of this innovation may be developed with the Carreau -Yasuda model and soft computing tools.

Keywords: polymer extrusion, natural gas, temperature control, energy saving

1. Introducción

En pequeñas industrias se ha comenzado a observar la conversión a gas de las unidades de plastificación, mediante el uso de quemadores tipo flauta. Pero estas iniciativas no se han masificado porque la temperatura de los gases de combustión es muy alta y puede afectar los materiales de la máquina y la calidad

del producto extruido si no se tiene un control de temperatura diseñado para esta innovación.

De acuerdo a (Acoplásticos, 2007) 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.

A pesar de la importancia del consumo energético en este tipo de industrias, 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 Comsumption in Plastics*), la cual ha llevado a cabo una encuesta iniciada en 2005 y 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 CO₂. 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.

1. Iniciativas de calentamiento a gas del barril de extrusión

En el proceso de extrusión, el polímero granulado es transportado por un tornillo y es fundido por la fricción generada en dicho movimiento y por calentamiento realizado convencionalmente mediante resistencias eléctricas.

Figura A1 Subproceso de plastificación en extrusión.

En el sistema de plastificación a gas la energía necesaria para fundir el polímero, calentarlo y transportarlo es generada por el tornillo y una unidad de calentamiento-enfriamiento por donde fluyen los gases de combustión (7) y el aire forzado para enfriamiento (10). El enfriamiento en extrusión es estudiado por (Lebaudy, Siter, Grenet, & Vautier, 1995) quienes obtuvieron un coeficiente de transferencia de calor para enfriamiento con aire forzado , (Womer, Walter, &

Wheeler, 2006) 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 requiera una mayor transferencia de energía para mantener la temperatura de proceso y (Rauwendaal & Auburn, 2008) patentan un tipo de tornillo que facilita el enfriamiento en procesos de extrusión de espumas.

Figura A2 Quemador a gas para extrusión de plástico. (Adelt, et al., 2003).

Recientemente (Wortberg & Bussmann, 2010) resaltan la importancia de retomar la modelación experimental del calentamiento a gas en extrusión, tomando como base 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.

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 (Arthkamp, 2003) enuncia los aspectos que se deben tener en cuenta para implementar un quemador a gas en plastificación: pocas modificaciones en la unidad de calentamiento comparando 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.

En el ámbito académico la innovación de conversión a gas fue propuesta por la Universidad Duisburg- Essen (Wortbeg & Schroer, 2003) con una investigación experimental cuyo prototipo de unidad de calentamiento-enfriamiento está acoplado a un barril y no a un proceso de extrusión propiamente dicho. Obtuvieron con una eficiencia de combustión entre 75%- 80%, una disminución en el costo energético de 60% y de emisión de CO₂ de 55%. Estos autores obtuvieron valores experimentales del coeficiente global de transferencia de calor para plastificación con gas y sugieren recuperar el calor de los gases de combustión para utilizarlo en el precalentamiento del plástico granulado. Como aplicación industrial de estos estudios (Bürkle, Hungerkamp, & Würtele, 2007) obtuvieron en un proceso de inyección mediante conversión a gas una disminución de 58% en el costo energético.

2. Otros sistemas de calentamiento del barril de extrusión

La forma como actualmente se realiza el calentamiento del barril de extrusión es mediante resistencias eléctricas, (Harper, 2006), hay diferentes tipos de estas como son las tubulares, tipo cartucho y tipo banda.

Tabla A1. Capacidad de calentamiento de resistencias eléctricas. Adaptada de (Harper, 2006).

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, (Noriega & Estrada, 2009). La ventaja de este sistema frente a las resistencias eléctricas convencionales según (Xaloy, 2008) 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.

3. Modelamiento 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 al fundirse reducen su viscosidad con las altas tasa de corte que genera el proceso de extrusión, es decir que a la temperatura de proceso 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, pero es un modelo del que aún no se han obtenido soluciones analíticas, es por esto que autores como (Derezinski, Heat transfer coefficients in extruder melt sections, 1996), (Derezinski, 1997) y (Rauwendaal & Ponzielli, Temperature development in Screw Extruders, 2003) lo utilizan para obtener perfiles de temperatura, consumo de potencia y coeficientes de transferencia de calor mediante métodos numéricos o programas de simulación.

(Tadmor, Duvdevani, & Klein, 1966) son los pioneros en el análisis matemático del proceso de plastificación, diferenciando dos zonas dentro del canal de extrusión: la cama del sólido y el pozo de polímero fundido; (Rauwendaal Extrusion Engineering, Inc. , 2008) obtienen un perfil de temperatura para el pozo de polímero fundido y (Noriega, Naranjo, Osswald, & Ferrier, 2008) patentan un dispositivo para visualizar en línea la fusión de polímeros, utilizando este dispositivo (Noriega M. , Naranjo, Osswald, & Ferrier, 2011) observan que existe

un retardo en la fusión ocasionado por el hecho de que el polímero fundido debe llenar los espacios del material sólido granulado.

Figura A3 .Cama de sólido y pozo de polímero fundido. Adaptada de (Rauwendaal, 2001)

(Manab & Ghosdastidar, 2001) tuvieron en cuenta el efecto de convección transversal, es decir la convección normal al labio del tornillo y a la base del canal de extrusión, solucionan el modelo con volúmenes de control en dos direcciones y es por esto que le llaman cuasi tridimensional; las ecuaciones las solucionan con el método de volúmenes finitos y obtienen perfiles de temperatura y presión en la superficie del tornillo y valores de temperatura de entrada al dado de extrusión. (Wilczyński, 2001) presenta un modelo computacional para extrusora de un tornillo (*Single-Screw Extrusion Model, SSEM*), desarrollado para diferentes geometrías de tornillo y dado de extrusión. El modelo puede predecir flujo másico, perfiles de temperatura y presión, no utiliza elementos finitos sino el cálculo de algoritmos en Turbo Pascal y el autor solamente presenta los resultados obtenidos para la presión.

Wei & Luo, 2003) estudian 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, obtienen un perfil de temperatura tridimensional en función de la distancia radial (R) y axial (Z). (Shokouhmand & Soleimani, 2011) en un trabajo similar observan

que se invierte la dirección del flux de calor en una placa cuando se tienen altas tasas de disipación viscosa.

Figura A 4. Perfil de temperatura tridimensional. Tomado de (Wei & Luo, 2003).

(Vaddiraju, Kostic, Reifschneider, Pla-Dalmau, Rykalin, & Bross, 2004) realizan una simulación y validación experimental del proceso de extrusión mediante Polyflow de ANSYS y concluyen que el exponente de la ley de viscosidad de Carreau - Yasuda tiene una influencia bastante significativa en la simulación, recomiendan 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.

4. Influencia de la temperatura de plastificación 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 extruido, (Combeaud & Vergnes, 2004) muestran en su estudio experimental que 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, (Assadi & Colin, 2004) 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. (Da Costa, Ramos, & Rocha, 2005) 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 autores muestran en sus estudios sobre reología la influencia de la temperatura en el proceso de extrusión, (Martyn, Nakason, & Coates, 2000) realizó este tipo de estudios en poliolefinas, (Bariani, Salvador, & Lucchetta, 2007) 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 (Chen, Chao, & Chiu) proponen un modelo empírico para evaluar la viscosidad de polímeros termoplásticos, específicamente del polipropileno, en las ecuaciones que plantean se observa la variación exponencial de la viscosidad con la temperatura. (Baird, 2008) considera que tiene una importancia crucial 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. (Liang, 2002) explican que los picos de temperatura afectan la capacidad de movimiento de las macromoléculas y por lo tanto las propiedades reológicas del polímero, la experimentación la realizó con polietileno de baja densidad, con esta apreciación coinciden (Musil & Zatloucal,

2001) quienes realizaron una experimentación sobre el fraccionamiento del peso molecular en la extrusión de polietileno de alta densidad.

5. Control de temperatura en plastificación

Los controles tradicionales como el control proporcional integral derivativo (PID) en extrusión de poliolefinas ocasionan 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 (CESAP) tuvo como resultado (Predivi, Savaresi, & Paronotto, 2006) 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 por la rápida reacción a las perturbaciones en las condiciones de operación

como son los cambios inesperados en la calidad del material, para demostrar esto realizaron validación experimental para polipropileno virgen y remolido y para polietileno y poliestireno.

La dificultad en la solución determinística de las ecuaciones diferenciales que rigen la temperatura de plastificación 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 para la extrusión de un polímero no newtoniano como es el poliestireno en estado no estacionario por (Pujos, Regnier, & Defaye, 2008), quienes realizan la simulación del modelo mediante el método de volúmenes finitos con el programa computacional AQUILON® (Trefle, 2005) y consideran que la principal causa de error es no haber considerado la dependencia entre viscosidad y presión. Recientemente fue aplicada por (Parwani, Prabal, & Subbarao, 2012) 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, las cuales son fluidos no newtonianos, 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.

(Tadmor, Lipshitz, & Lavie, Dinamic model of a plasticating extruder, 1974) 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, (Tan, Lofti, Lai, & Hull, 2004) proponen 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. Solucionan 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 con un buen grado de precisión, adaptándose a perturbaciones como cambio del material a procesar, variación en la temperatura del barril, la velocidad (rpm) del husillo o la presión de plastificación. Obtienen predicciones para la temperatura promedio (*bulk temperature*) en función del tiempo.

Figura A 5. Aplicación de algoritmos genéticos y de lógica difusa en modelos predictivos. Adaptado de (Tan, et al., 2004).

Complementando el trabajo anterior (Abeykoon, Li, McAfee, Martin, Niu, & Kelly, 2011) obtienen 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 a 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, (Yao, Gao, & Allgöwer, 2008) proponen para controlar la temperatura del barril de una inyectora, 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 no permita variaciones muy altas en la temperatura, evitando 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 al 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, (Abeykoon, Martin, Kelly, & Brown, 2012) recomiendan la malla de termocuplas porque 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.

(Sorroche, y otros, 2012) 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 sensibles a la temperatura de tal forma que las variaciones de temperatura ocasionan cambios en el espectro fluorescente.

Tabla A2. Comparación entre diferentes tipos de sensores de temperatura.
Adaptada de (Sorroche, y otros, 2012)

6. Conclusiones

El sistema de calentamiento a gas es más eficiente que los sistemas de calentamiento por inducción y por resistencias eléctricas porque ocasiona cerca de doce veces menos pérdidas en el transporte de energía por cada kilovatio-hora utilizado en plastificación y si adicionalmente se considera que consume menos energía en el arranque y se pueden recuperar los gases de combustión para precalentar la materia prima es posible obtener una eficiencia aún mayor al implementar esta innovación. La eficiencia reportada para un quemador a gas en plastificación está entre 75% y 80%, esta se obtuvo mediante la utilización de un anillo entre la superficie externa de la cámara de combustión y el barril de extrusión, generando un calentamiento adicional por radiación sobre el barril.

Variaciones de 10°C en el proceso de extrusión producen defectos volumétricos apreciables en el producto extruído y 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 PE y PP como fluidos no newtonianos hace que el efecto de calentamiento viscoso en este proceso sea bastante considerable, para cuantificarlo se considera el modelo de Carreau-Yasuda como el más realista 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 y simulación, perfiles de temperatura y coeficientes de transferencia del calor entre el polímero y el barril de extrusión aplicables a bajas rpm, la dificultad en la precisión se presenta a altas rpm de producción industrial.

La dificultad en la solución determinística de las ecuaciones que rigen los fenómenos de transporte en el proceso de extrusión crea la necesidad de aplicar modelos predictivos de programación liviana en el diseño del control de temperatura. La validación experimental de estos modelos se debe realizar con sensores invasivos como la malla de termocuplas porque los sensores no invasivos tienden a registrar la temperatura del barril en vez de registrar la temperatura de proceso.

Referencias

- Abeykoon, C. y otros, 2011. A new model based approach for the prediction and optimisation of thermal homogeneity in single screw extrusion. *Control Engineering Practice*, 19, pp. 862-874.
- Abeykoon, C., Martin, P., Kelly, A. & Brown, E., 2012. A review and evaluation of melt temperature sensors for polymer extrusion. *Sensor and Actuators A*, p. 12.
- Acoplásticos, 2007. [En línea] : <http://www.acoplásticos.org> [Último acceso: 20 Enero 2010].
- Adelt, M., Arthkamp, J. & Selbert, H., 2003. Alemania, Patente nº EP 1 300 233 A1.
- Arthkamp, J., 2003. Natural gas in Plastic Processing. *Kunststoffe*, 10, pp. 89-93.
- Assadi, R. & Colin, X., 2004. Irreversible structural changes during PET recycling by extrusion. *Polymer*, 45, pp. 4403-4412.
- Baird, D., 2008. 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 Fluid Mech.*, 148, pp. 13-23.
- Bariani, P., Salvador, M. & Lucchetta, G., 2007. Development of a test for the rheological characterization of polymers under the injection molding process conditions. *Journal of Material Processing Technology*, 191, pp. 119-122.
- Bendada, A. & Lamontagne, M., 2004. A new infrared pyrometer for polymer temperature measurement during extrusion molding. *infrared Phys. Technol.*, 46, pp. 11-15.
- Brown, E., Kelly, A. & Coates, P., 2004. Melt temperature field measurement in single screw extrusion using thermocouple meshes. *Rev. Sci. Instrum.*, 75 (11), pp. 4742-4748.
- Brown, E., Olley, P. & Coates, P., 2000. In line melt temperature measurement during real time ultrasound monitoring of single screw extrusion. *Plast. Rubb. Comp.*, 29, pp. 3-13.
- Bruker, I., Miaw, C., Hasson, A. & Balch, G., 1987. Numerical analysis of the temperature profile in the melt conveying section of a single screw extruder. *Polym. Eng. Sci.*, pp. 504-509.
- Bur, A. y otros, 2004. Temperature gradients in the channels of a single extruder. *Polym. Eng. Sci.*, 44 (11), pp. 2148-2157.
- Bürkle, E., Hungerkamp, T. & Würtele, M., 2007. Plasticizing Systems heated by Natural Gas. *Kunststoffe international* 9, pp. 128-131.
- Chen, Z., Chao, P. & Chiu, S., 2003. Proposal of an empirical viscosity model for quality control in the polymer extrusion process. *Polymer Testing*, Issue 22, pp. 601-607.
- Combeaud, Y. & Vergnes, B., 2004. Experimental study of the volume defects in polystyrene extrusion. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 121, pp. 175-185.
- Da Costa, H., Ramos, V. & Rocha, C., 2005. Rheological properties of polypropylene during multiple extrusion. *Polymer testing*, 24, pp. 86-93.

- Derezinski, S., 1996. Heat transfer coefficients in extruder melt sections. *Antec*, pp. 417-421.
- Derezinski, S., 1997. Calculating Power of Extruder Melt Sections. *Antec*, p. 8.
- Günther, F., Liu, W., Diachin, D. & Christon, M., 2000. Multi-scale meshfree parallel computations for viscous compressible flows. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 190, pp. 279-303.
- Harper, C., 2006. *Handbook of Plastic Processes*. New Jersey , USA: Wiley & Sons.
- Kelly, A., Brown, E., Howell, K. & Coates, P., 2008. Melt temperature field measurement in extrusion using thermocouple meshes. *Plast. Rubb. Comp.*, 37, pp. 151-157.
- Lebaudy, J., Siter, M., Grenet, J. & Vautier, C., 1995. Temperature distribution in polyethylene terephthalate plate undergoing heat treatment. *Polymer*, 36(6), pp. 1217,1221.
- Liang, J., 2002. The elastic behavior during capillary extrusion of LDPE/LLDPE. *Polymer Testing*, 21, pp. 69-74.
- Manab, K. & Ghosdastidar, P., 2001. Experimental validation of quasi three-dimensional conjugate heat transfer model for the metering section of a single screw plasticating extruder. *Materials Processing Technology*, 120, pp. 397-411.
- Martyn, C., Nakason, C. & Coates, P., 2000. Stress measurements for contraction flows of viscoelastic polymer melts. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 91, pp. 123-142.
- Musil, J. & Zatloucal, M., 2001. Experimental investigation of flow induced molecular weight fractionation during extrusion of HDPE polymer melts. *Chemical Engineering Science*, 66, pp. 4814-4823.
- Noriega, M. & Estrada, O., 2009. *Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico y el Caucho*. [En línea] <http://www.icipc.org> [Último acceso: 23 Enero 2010].
- Noriega, M., Naranjo, A., Osswald, T. & Ferrier, N., 2008. Colombia, Patente nº en requerimiento, expediente 3 12620.
- Noriega, M., Naranjo, A., Osswald, T. & Ferrier, N., 2011. Comparison of the melting behavior of HDPE y PP in single screw extruder. *Antec*, p. 8.
- Parwani, A., Prabal, T. & Subbarao, P., 2012. Estimation of inlet temperature of a developing fluid flow in a parallel plate channel. *International Journal of Thermal Sciences*, 57, pp. 126-134.
- Predivi, F., Savaresi, M. & Paranotto, A., 2006. Design of a feedback control system for real time control of flow in a single - screw extruder. *Control Engineering Practice*, 14, pp. 345-355.
- Pujos, C., Regnier, N. & Defaye, G., 2008. Determination of the inlet temperature profile of an extrusion die in unsteady flow. *Chemical Engineering and Processing*, pp. 456-462.
- Rauwendaal Extrusion Engineering, Inc , 2008. *Rauwendaal*. [En línea]:<http://www.rauwendaal.com> [Último acceso: 20 Enero 2010].
- Rauwendaal, C., 2001. *Polimer Extrusion*. München: Carl Hanser Verlag.

Rauwendaal, C. & Auburn, C., 2008. Estados Unidos, Patente nº US 20080315455A1.

Rauwendaal, C. & Ponzielli, G., 2003. Temperature development in Screw Extruders. *Antec*, p. 16.

Sabota, K., Lawson, D. & Huizinga, J., 1995. Advanced temperature measurements in polymer extrusion. *Antec*, pp. 2832-2842.

Shen, X., Malloy, R. & Pacini, J., 1992. An experimental evaluation of melt temperature sensors for termoplastic extrusion. *Antec*, pp. 918-926.

Shokouhmand, H. & Soleimani, M., 2011. 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.

Sorroche, J. y otros, 2012. Thermal optimisation of Polymer Extrusion using In-process Monitoring Techniques. *Applied Thermal Engineering*, p. 42.

Tadmor, Z., Duvdevani, I. & Klein, I., 1966. Engineering Principles of Plasticating Extrusion. *Eng. Sci*, 6, 185, pp. 202-222.

Tadmor, Z., Lipshitz, S. & Lavie, R., 1974. Dinamic model of a plasticating extruder. *Polym. Eng. Sci.*, 14 (2), pp. 112-119.

Tan, L., Lofti, A., Lai, E. & Hull, J., 2004. Soft computing aplicaciones in dynamic model identification of polymer extrusion process. *Applied soft computing*, 4, pp. 345-355.

TREFLE, 2005. *TREFLE*. [En línea]: <http://www.trefle.u-bordeaux1.fr/aquilon> [Último acceso: 12 Junio 2012].

Vaddiraju, s. y otros, 2004. Extrusion Die Design Optimization Including Viscoelastic Polymer Simulation. *Antec*, p. 29.

Wei, D. & Luo, H., 2003. Finite elements solutions of heat transfer in molten polymer flow in tubes with viscous dissipation. *International Journal of heat and Mass Transfer*, 46, pp. 3097-3108.

Wilczyński, 2001. SSEM: a computer model for a polymer single screw extrusion. *Journals of materials processing Technology*, 109, pp. 308-313.

Womer, T., Walter, S. & Wheeler, R., 2006. Comparison of two different cooling methods for extrusion processes. *Antec*, pp. 796-799.

Wortbeg, J. & Schroer, S., 2003. Novel Barrel Heating with Natural Gas. *ANTEC*, pp. 98-101.

Wortberg, J. & Bussmann, M., 2010. An alternative plastification system based on natural gas. *Journal of Plastic Technology*, 6(2), pp. 92-111.

Xaloy, 2008. *Xaloy*. [En línea] : <http://www.xaloy.com> [Último acceso: 23 Enero 2010].

Yao, K., Gao, F. & Allgöwer, F., 2008. Barrel temperature control during operation transition in injection molding. *Control Engineering Practice*, pp. 1259-1264.

FIGURAS

Figura A1. Subproceso de plastificación en extrusión.

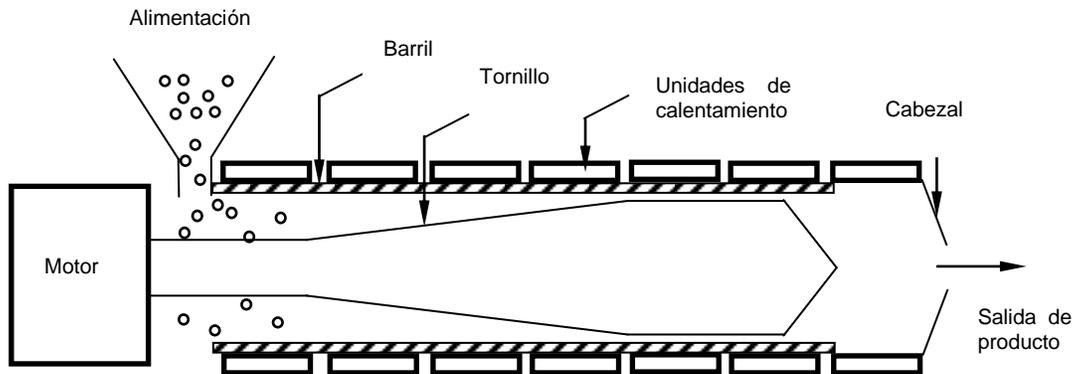
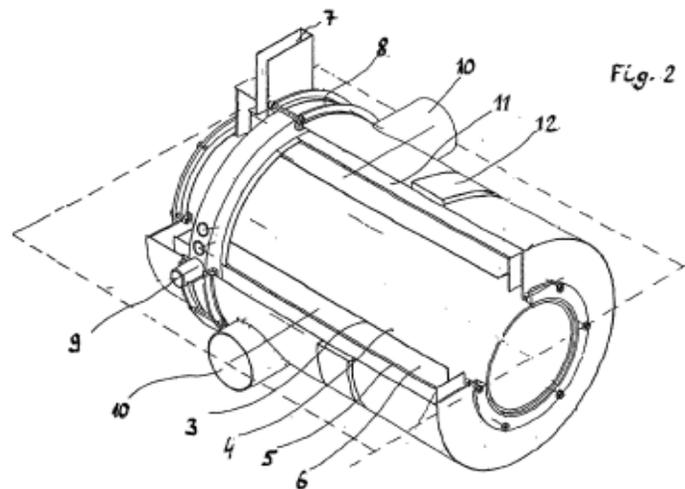
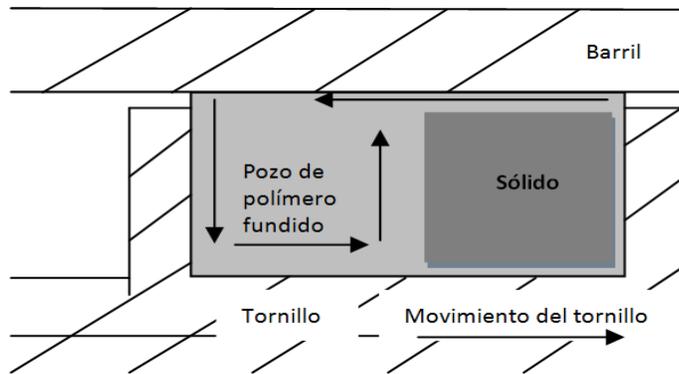


Figura A2. Quemador a gas para extrusión de plástico. (Adelt, et al., 2003)



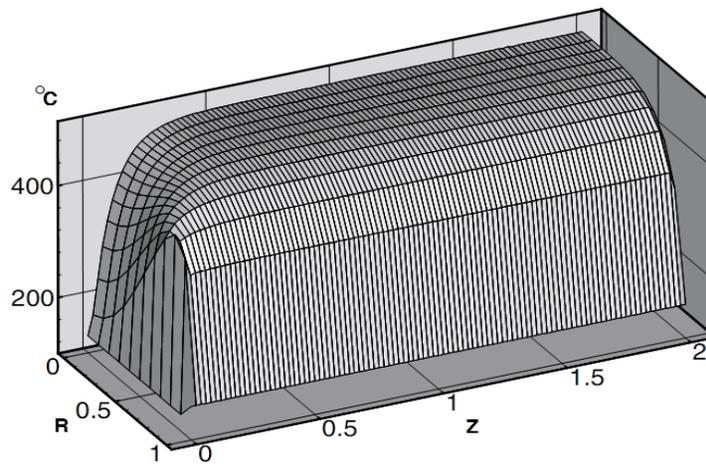
Fuente: (Adelt, et al., 2003)

Figura A3. Cama de sólido pozo de polímero fundido. Adaptadas de (Rauwendaal, 2001)



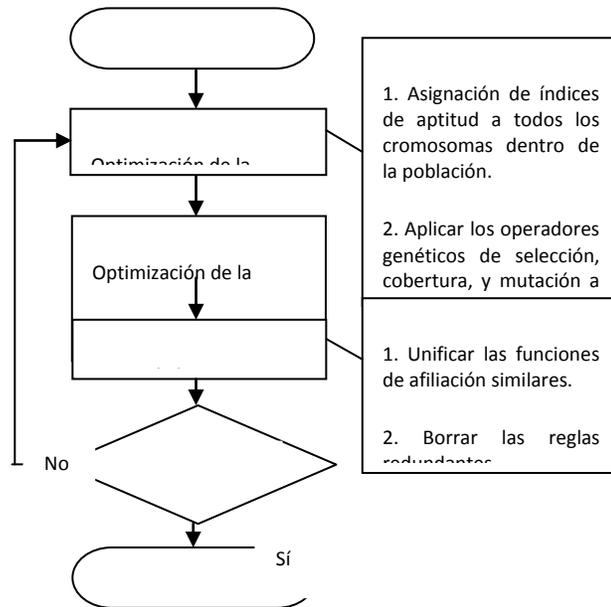
Fuente: (Rauwendaal, 2001)

Figura A4. Perfil de temperatura tridimensional. Tomado de (Wei & Luo, 2003)



Fuente: (Wei & Luo, 2003)

Figura 4. Aplicación de algoritmos genéticos y de lógica difusa en modelos predictivos. Adaptado de (Tan, et al., 2004)



Fuente: (Tan, Et Al., 2004)

TABLAS

Tabla A1. Capacidad de calentamiento de resistencias eléctricas. Adaptada de (Harper, 2006)

Tipo de resistencia	Capacidad de calentamiento [W/pulg ²]
Tubular	20 – 40
Cartucho	40
Banda	30 – 40

Fuente: Harper, 2006

Tabla A2. Comparación entre diferentes tipos de sensores de temperatura. Adaptada de (Sorroche, y otros, 2012)

Método	Características	Invasivo	Respuesta dinámica	Fuente
Termocupla montada en pared	Temperatura promedio (<i>bulk temperature</i>), afectada por la temperatura de pared	No	~1 s	(Shen, Malloy, & Pacini, 1992)
Termocupla saliente	Perfil de temperatura interrumpe el flujo de polímero, error por conducción en su longitud y por calentamiento viscoso alrededor de la punta	Si	> 1 s	(Sabota, Lawson, & Huizinga, 1995)
Termocupla atravesada	Perfil de temperatura, sujeta a errores por conducción y calentamiento viscoso	Si	~1 s	(Bruker, Miaw, Hasson, & Balch, 1987)
Malla de termocuplas	Múltiples mediciones, da perfil de temperatura en dos dimensiones	Si	~0.1 s	(Brown, Kelly, & Coates, 2004) y (Kelly, Brown, Howell, & Coates, 2008)
IR de no contacto	Temperatura promedio sobre un volumen cónico cercano a la pared, la medida depende del tipo de material	No	10 ms	(Bendada & Lamontagne, 2004)

Ultrasonido	Temperatura promedio a través de la línea central de flujo, requiere calibración cuidadosa para cambios de presión y tipo de material	No	~1 ms	(Brown, Olley, & Coates, In line melt temperature measurement during real time ultrasound monitoring of single screw extrusion, 2000)
Colorantes fluorescentes	Perfil de temperatura, depende del tipo de material	No	~0.5 s	(Bur, Roth, Spalding, Baugh, Koppi, & Buzanowski, 2004)

Fuente: (Sorroche, Y Otros, 2012)