

# 58

Fecha de presentación: diciembre, 2021

Fecha de aceptación: marzo, 2022

Fecha de publicación: mayo, 2022

## EL ENFRIAMIENTO

PARA MENORES EMISIONES DE CO<sub>2</sub> AL MEDIO AMBIENTE EN EXTRUSIÓN DE TUBERÍAS PLÁSTICAS.

### COOLING FOR LOWER CO<sub>2</sub> EMISSIONS TO THE ENVIRONMENT IN PLASTIC PIPE EXTRUSION.

Antonio Jiménez Ramos

E-mail: [antonio@petrocasacfg.co.cu](mailto:antonio@petrocasacfg.co.cu)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5704-5301>

Juan Francisco Puerta Fernández

E-mail: [jfpuerta@ucf.edu.cu](mailto:jfpuerta@ucf.edu.cu)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5642-5508>

Julio Rafael Gómez Sarduy

E-mail: [julio@ucf.edu.cu](mailto:julio@ucf.edu.cu)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3313-6572>

Yoelbis Jiménez Santana

E-mail: [scy87@nauta.cu](mailto:scy87@nauta.cu)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3268-7129>

<sup>1</sup> Empresa de Producciones Plásticas Vasil Levski.

<sup>2</sup> Universidad de Cienfuegos. Cuba.

#### Cita sugerida (APA, séptima edición)

Garcés Suárez A., Puerta Fernández J. F., Gómez Sarduy J. R. & Jiménez Santana Y., (2022). el enfriamiento para menores emisiones de co<sub>2</sub> al medio ambiente en extrusión de tuberías plásticas. *Revista Universidad y Sociedad*, 14(3), 574-588.

#### RESUMEN

El objetivo de la investigación es calcular el tiempo de enfriamiento necesario para alcanzar las menores emisiones de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) al medio ambiente en la extrusión de tuberías plásticas, según el comportamiento individual de tres propiedades seleccionadas de la materia prima: calor específico (cp.), densidad ( $\rho$ ) y conductividad térmica (k), para variados surtidos según una temperatura deseada en la superficie interior y exterior. La metodología de cálculo se realiza mediante un algoritmo, que utiliza modelos matemáticos y como herramienta de solución, el software Wolfram Mathematica 11.0 y el software Startgraphics Centurion XV. Los resultados se obtienen a través de estudios prácticos, teóricos y experimentales. Fueron utilizadas líneas de máquinas extrusoras de varios flujos, termómetro industriales SIKA-Matec medición y Ss 304 y medidores de espesores multifuncionales ultrasonidos PCE-TG 100 de 0.8 mm a 225 mm de rangos. Resultados obtenidos: para el calor específico y la densidad el tiempo de enfriamiento disminuye según decrecen en magnitud, al igual que los índices de consumo energéticos y las emisiones de CO<sub>2</sub>. La conductividad térmica es todo lo contrario. Se tuvo en cuenta que el uso de la energía utilizada generalmente para esta producción es de centrales térmicas.

**Palabras claves:** tiempo de enfriamiento necesario, emisiones de CO<sub>2</sub>, extrusión de tuberías plásticas, propiedades termofísicas.

#### ABSTRACT

The objective of the research is to calculate a necessary cooling time to achieve lower CO<sub>2</sub> emissions to the environment in the extrusion of plastic pipes, according to the individual behavior of three selected properties of the raw material, specific heat, (cp.), Density, ( $\rho$ ) and thermal conductivity (k), for various assortments according to a desired temperature on the interior and exterior surface. The calculation methodology is carried out by means of an algorithm, which uses mathematical models and as a tool for its solution, the Wolfram Mathematica 11.0 software and the Startgraphics Centurion XV software. The results are obtained through practical, theoretical and experimental studies. For the work, lines of extruder machines of various flows, industrial thermometers SIKA-Matec measurement and Ss 304 and multifunctional ultrasonic thickness meters PCE-TG 100 from 0.8 mm to 225 mm ranges were used. For properties, specific heat and density, the time required decreases as they decrease in magnitude, as do the indices of energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions, taking into account that the use of the energy generally used for this production is the electrical one, existing an increase of product in general, the thermal conductivity is the opposite to these behaviors.

**Keywords:** necessary cooling time, CO<sub>2</sub> emissions, extrusion of plastic pipes, thermophysical properties.

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento anual del mercado mundial del plástico hasta 2032 se prevé en el entorno del 7.2 % y su impacto económico se pronostica en los \$2 865 billones de dólares con crecimientos similares al igual que en las emisiones de CO<sub>2</sub>, ya que para esa fecha no está previsto aún que la energía eléctrica sea totalmente de fuentes renovables y aunque así sea siempre será provechoso el ahorro. Esto justifica todos los esfuerzos que se realizan para lograr los mayores rendimientos productivos y energéticos. (Plan de Negocios, 2019). Ver anexos 1,2 y 3.

Este crecimiento de la industria del plástico tiene un impacto negativo en el deterioro ambiental a nivel mundial, tema de constante preocupación y que ha desencadenado múltiples esfuerzos por encontrar sus determinantes. Su difícil reciclaje y su baja capacidad de degradación tienen como consecuencia su acumulación en cantidades que generan además un efecto negativo sobre los seres vivos, ya sea por ingestión o por toxicidad (Bollaín & Vicente, 2020; Vinueza et al., 2021).

En la actualidad, los plásticos se producen de forma masiva para dar cabida a nuevas necesidades, lo que promueve un consumo incesante de los mismos. La mayor parte de los materiales plásticos producidos se emplean en la fabricación de productos de un solo uso como envases o botellas (Jaén et al., 2019).

Cuba no está exenta de este desarrollo y tiene planes ambiciosos de reducción de las cargas contaminantes al medio ambiente, el cual se encuentra en estos momentos en aproximadamente 0.700 gramos de CO<sub>2</sub> por cada kW/h producido (Velázquez, 2020).

El propio trabajo con los plásticos puede ser también una fuente de contaminación por los procesos que se desarrollan relacionados con el consumo de energía, entre ellos: extrusión, inyección, termo formado, calandrado, espumado y otros. El más utilizado en la producción de tuberías es la extrusión, que se define como un proceso continuo, donde la resina es fundida, por la acción de la temperatura y la fricción, siendo forzada a pasar por un molde, que le proporciona una forma definida, para ser enfriada finalmente y evitar deformaciones

permanentes. Se fabrican por este proceso: tubos, perfiles, películas, manguera, láminas, filamentos, pellets y otros. Energéticamente los procesos de transformación de plásticos en general, requieren de un gran aporte de energía, tanto calorífica como mecánica (Jiménez et al., 2015). Por una parte, los plásticos deben calentarse para lograr fundirlos o extruirlos y así poder ser procesados, necesitando para ello aproximadamente el 50% de la energía necesaria para la producción. Posteriormente el producto se enfría, transporta, corta, bobina o peletiza y para ello requiere de aproximadamente del 15 al 25 % de la energía total dedicada a este proceso (Heesen & Wortberg, 2015; Hiesgen et al., 2016).

Los costos operacionales de la energía en estos procesos pueden representar entre el 4 y el 10 % en una planta de transformación de plástico (Novoa, 2009). El tiempo de enfriamiento, toma la mayor parte del total de la producción en cualquier termo proceso plástico y para lograr que los cálculos sean óptimos es necesario el conocimiento de sus propiedades térmicas, como el calor específico, la densidad y la conductividad térmica de los materiales que se procesan (Wesley, 2012). Con el objetivo de controlar los niveles de consumo en los procesos de extrusión, se han realizado diversos estudios, para el mejoramiento de su desempeño energético (Rahman et al., 2018; Krstić & Nikolić, 2018; Quevedo et al., 2021).

El control energético en esta industria, varía en dependencia del tipo de centro de investigación, tecnología utilizada, las empresas y países que producen los bienes materiales y la investigación científica (Jiménez et al., 2019). De ahí que existan índices de consumo de la energía con respecto a la producción en general, por surtidos, ramas, según flujo a la salida de las máquinas, por puestos claves seleccionados en las industrias, entre otros. Estos índices de consumo, han devenido en un indicador de desempeño energético aplicable a sistemas de gestión de la energía basados en la norma internacional que gestiona su implementación en muchas empresas (ISO 50001, 2011, ISO 50002, 2014; Tim et al., 2012; Vargas et al., 2015).

La Figura 1 muestra la línea simplificada de extrusión de tuberías.

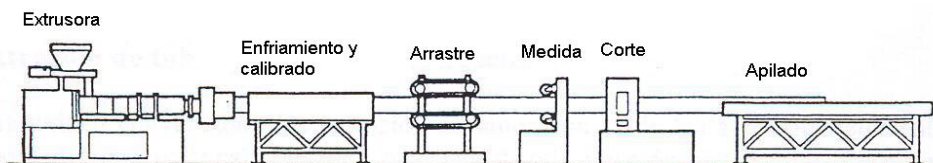


Figura 1. Línea simplificada de extrusión de tuberías. Fuente: Elaboración propia, 2022.

Ver extrusora actual (Anexo 4).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para el trabajo fueron utilizadas líneas de máquinas extrusoras de varios flujos, termómetro industriales SIKA-Matec medición y Ss 304 y medidores de espesores multifuncionales ultrasonidos PCE-TG 100 de 0.8 mm a 225 mm de rangos. Se aplicaron diversos métodos, como son: el método histórico lógico, el método comparativo, el análisis y la síntesis, el tratamiento automatizado de la información, así como, del nivel matemático, el empleo de un método de análisis numérico, en específico el método de solución exacta, condición de contorno isotérmica, para calcular mediante software de avanzada las soluciones exactas y estadísticas, el método de regresión, de varianza y de correlación.

El enfriamiento por extrusión, se produce al salir el sub producto del molde y penetrar en el calibrador que se encuentra en la bañera de enfriamiento. En él debe lograrse a la salida de la misma una determinada temperatura en la superficie interior y exterior de la tubería que evite deformaciones del perfil y afectaciones en la calidad del producto final.

Para alcanzar la temperatura deseada a la salida de la bañera, según el espesor y diámetro de que se trate, se requerirá un determinado tiempo de enfriamiento que dependerá del flujo de material, de sus propiedades termofísicas, nivel de producción dado, de las propiedades del agua de enfriamiento, de la temperatura y régimen de circulación del agua helada, de las dimensiones del producto y de la bañera de enfriamiento (Jiménez et al., 2019). Para este caso fue considerada la temperatura en la superficie de 30°C como promedio en general temperatura ambiente y en el interior 60°C pues superior a esta se comienzan a perder propiedades mecánicas para su funcionamiento y etapas por las cuales transita el proceso. El trabajo se desarrolla en coordenadas cilíndricas por ser esta la geometría utilizada con las siguientes suposiciones para el modelo: El estado es transitorio, Flujo externo, Transferencia de calor por convección forzada con flujo de calor transversal al tubo. Las mayores temperaturas están en el centro del perfil. El calor transferido para el enfriamiento es considerado por conducción y convección (Jiménez et al., 2017).

Para conocer el perfil de temperaturas del plástico a lo largo de la bañera de enfriamiento se procede a realizar un balance de calor general en un elemento de volumen diferencial de un tubo infinito con convección en la superficie lateral exterior y aislamiento térmico en la superficie lateral interior, que da como resultado para un tiempo mayor que cero la siguiente ecuación para la superficie y para el centro del perfil (ecuaciones 1 y 2).

$$T > 0 \left\{ \begin{array}{l} r = Re : \left( \frac{\partial \phi}{\partial r} \right)_{r=Re} = a_1 \cdot \phi = -\frac{h_c}{k} \phi \\ r = Ri : \left( \frac{\partial \phi}{\partial r} \right)_{r=Ri} = 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

$$r = Ri : \left( \frac{\partial \phi}{\partial r} \right)_{r=Ri} = 0 \quad (2)$$

Y como resultado final después de haber trabajado estas ecuaciones se obtiene la solución general del problema como una combinación lineal de infinitas soluciones de intervalos para los infinitos auto valores  $\lambda_n$  como se muestra en la (ecuación 3).

$$\phi(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\lambda_n^2 \alpha t} \frac{\int_{Ri}^{Re} r \phi_0 [J_0(\lambda_n r) Y_1(\lambda_n Ri) - J_1(\lambda_n Ri) Y_0(\lambda_n r)] dr}{\int_{Ri}^{Re} r [J_0(\lambda_n r) Y_1(\lambda_n Ri) - J_1(\lambda_n Ri) Y_0(\lambda_n r)]^2 dr} \cdot [J_0(\lambda_n r) Y_1(\lambda_n Ri) - J_1(\lambda_n Ri) Y_0(\lambda_n r)] \quad (3)$$

Estas ecuaciones y su desarrollo han sido publicadas por el autor en la Revista Ingeniería Energética del Centro de investigaciones electro energética de la Universidad Tecnológica de Cuba José Antonio Echeverría, CUJAE.

La Figura 2 muestra el algoritmo de cálculo seguido en la investigación.

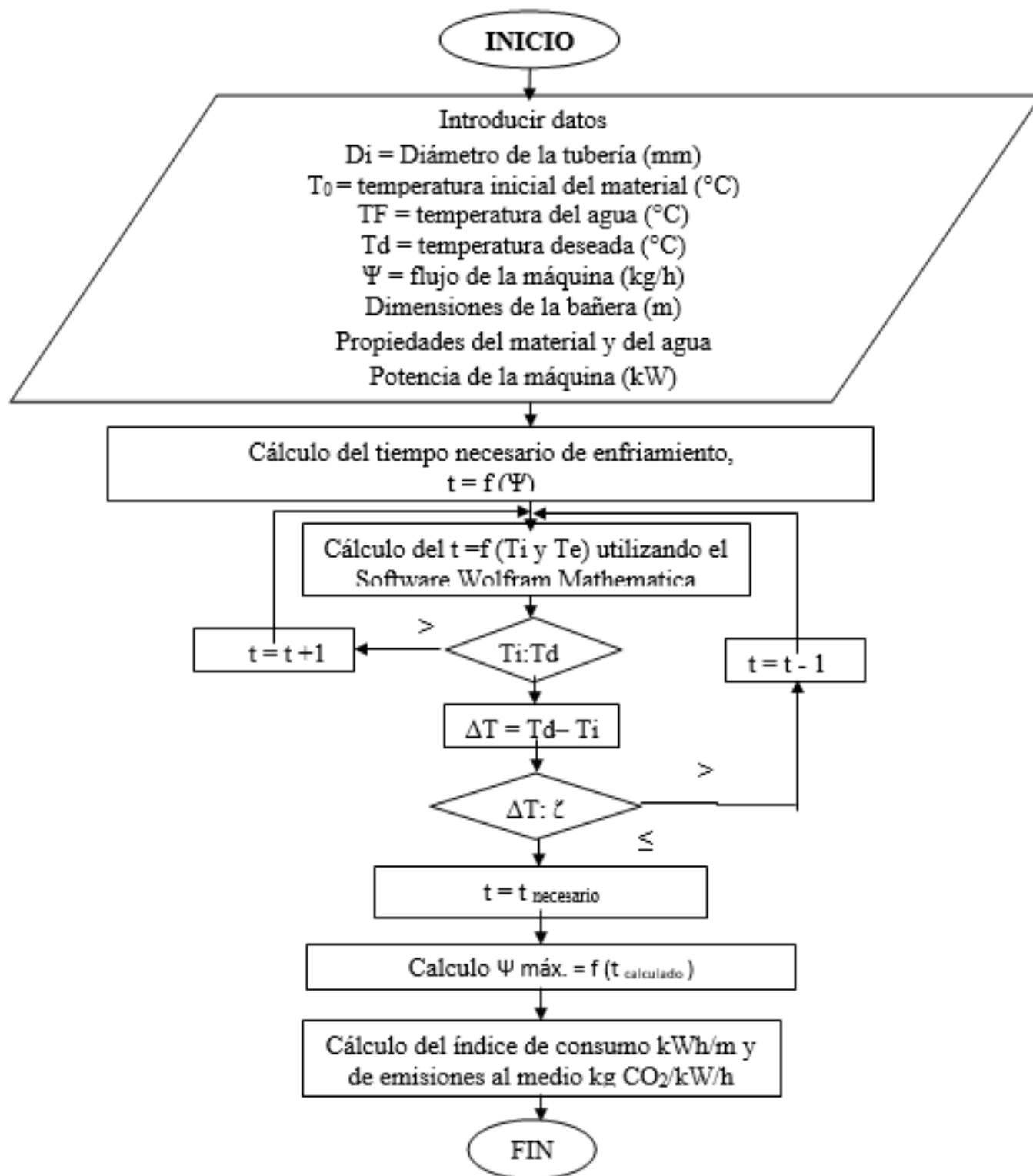


Figura 2 Algoritmo de cálculo. Fuente: Elaboración propia, 2022.

Realiza el primer cálculo del tiempo necesario según el flujo de la máquina teniendo en cuenta lo establecido por la norma DIN 8062-10 2009, UNE-ISO 2015, en cuanto al peso de la tubería, sus características de diámetro y espesor, seguidamente realiza el cálculo del tiempo que se demora en llegar a la temperatura deseada de la superficie interior o exterior de la tubería, según sea el caso teniendo en cuenta las propiedades termofísicas seleccionadas del material, aumentando o disminuyendo el valor del tiempo hasta alcanzar el parámetro diferencial que se desea de acuerdo a la exactitud planificada mediante la utilización de la herramienta Software Wolfram Mathematica 12.3. Si está dentro del parámetro, será el tiempo necesario para evaluar un nuevo flujo para la máquina y se compara con el anterior, para la toma de decisiones productivas y energéticas.

Por último, realiza el cálculo del índice de consumo y la emisión de CO<sub>2</sub> según sea el caso comparándose los resultados con los del flujo según norma.

El procedimiento utilizado para el cálculo de los resultados según el tipo de propiedad termofísicas fue el de mantener una variable y el resto constante, teniendo en cuenta que los resultados anteriores existen para un tipo de materia prima determinada (Jiménez et al., 2018).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El comportamiento de las propiedades térmicas utilizadas según los modelos matemáticos y software aplicados presentan el siguiente comportamiento siendo tomado como promedio de emisiones al medio ambiente la cifra de 0.700 kg de CO<sub>2</sub>/ kW consumido (Tabla 1).

Tabla 1 Propiedades de la materia prima utilizadas comercialmente.

$\rho$ = Densidad del material (kg/m <sup>3</sup> )	K= Conductividad térmica W/(m·K)	Cp= calor específico J/(kg·°C)
1 420	0,25	1 500
1 420	0,20	1 260
1 400	0,22	1 370
1 300	0,20	1 300
1 200	0,18	1 100

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Con estas propiedades se realizan las corridas según los espesores y diámetros en estudio para determinar sus relaciones y aportes en los resultados productivos, energéticos y su impacto en las emisiones al medio ambiente. Para este caso, tubería de 90 y 110 mm de diámetro y variados espesores. El índice de consumo fue calculado con el valor productivo de las propiedades físicas seleccionadas, para máquinas de 150, 200, 270 y 450 kg/h de flujo escogiéndose los flujos de 200 y 270 kg/h con una potencia de 86 y 121 kW respectivamente por ser estas las más utilizadas (Jiménez et al., 2019).

El primer reporte corresponde al comportamiento de las variaciones del calor específico, mientras se mantienen constantes el resto de las propiedades ( $k$  y  $\rho$ ) y los resultados se muestran en la Tabla 2, donde (1) espesor de la tubería, (2) peso del metro de tubería, (3) temperatura deseada para este caso, (4) temperatura en el radio interior, (5) temperatura en el radio exterior, (6) tiempo en segundos en alcanzar las temperaturas deseadas en radio interior y exterior en segundos, (7) y a partir del (8), (9), (10) y (11) corresponden a los flujos de diseño de las máquinas.

Observar que la temperatura deseada para todos los casos es de 30 grados para la superficie, pero en la medida que aumenta el espesor aumenta la temperatura en la superficie interior. Para espesores gruesos en que la temperatura interior sobre pasa los 60°C se invierte el control y se toma como referencia la interior, pues como ya se explicó a partir de esta temperatura este material comienza a perder propiedades mecánicas que afectan el resto del proceso.

Tabla 2. Comportamiento productivo variando  $C_p$ ,  $k$  y  $\rho$  constantes, tubería 90 mm de diámetro.

Espesor mm (1)	Kg/m P:F (2)	TD °C (3)	TRi °C (4)	TRe °C (5)	t. Seg (6)	Flujo P:F m/8h (7)	Flujo150 m/8h (8)	Flujo200 m/8h (9)	Flujo270 m/8h (10)	Flujo450 m/8h (11)
Cp. = 1 100 $\rho$ = 1 420 k = 0,22										
1,8	0,785	30	41	30	70	3 295	1 528	2 037	2 751	4 585
2,2	0,976	30	43	30	89	2 580	1 230	1 640	2 213	3 689
2,7	1,112	30	47	30	109	2 111	1 031	1 374	1 855	3 092
Cp. = 1 200 $\rho$ = 1 420 k = 0,22										
1,8	0,785	30	41	30	76	3 021	1 528	2 037	2 751	4 585
2,2	0,976	30	43	30	97	2 365	1 230	1 640	2 213	3 689
2,7	1,112	30	47	30	119	1 935	1 031	1 374	1 855	3 092
Cp. = 1 370 $\rho$ = 1 420 k = 0,22										
1,8	0,785	30	41	30	87	2 645	1 528	2 037	2 751	4 585
2,2	0,976	30	43	30	111	2 071	1 229	1 639	2 213	3 853
2,7	1,112	30	47	30	136	1 695	1 030	1 374	1 855	3 229
Cp. = 1 500 $\rho$ = 1 420 k = 0,22										
1,8	0,785	30	41	30	95	2 416	1 528	2 037	2 751	4 585
2,2	0,976	30	43	30	122	1 892	1 230	1 640	2 213	3 689
2,7	1,112	30	47	30	149	1 547	1 031	1 374	1 855	3 092

Fuente: Elaboración propia, 2022.

La Tabla 3 muestra el resumen de la Tabla 2 del comportamiento de esta propiedad.

Tabla 3 Resumen del comportamiento productivo y energético, varía el  $C_p$ ,  $k$  y  $\rho$  son constantes

$\rho = 1 420$ $k = 0,22$ , tubería 90 mm de diámetro				
Calor Específico J/(kg·°C)	1 500	1 370	1 200	1 100
Espesor(mm)	1,8			
Producción (m)	2 416	2 645	3 021	3 295
Tiempo mínimo (s)	95	87	76	70
Índice de consumo (kWh/m)	0,05008	0,04574	0,04005	0,03672
Emissiones de CO <sub>2</sub>	71.54	65.34	57.21	52.46
Espesor(mm)	2,2			
Producción (m)	1 892	2 071	2 365	2 580
Tiempo mínimo (s)	122	111	97	89
Índice de consumo (kWh/m)	0,06395	0,05842	0,05116	0,04689
Emissiones de CO <sub>2</sub>	91.36	83.46	73.09	66.99
Espesor(mm)	2,7			
Producción (m)	1 547	1 695	1 935	2 111
Tiempo mínimo (s)	149	136	119	109
Índice de consumo (kWh/m)	0,07816	0,07138	0,06253	0,05731
Emissiones de CO <sub>2</sub>	177.63	162.23	142.110	130.25

Fuente: Elaboración propia, 2022.

El comportamiento gráfico se muestra en la Figura 3.

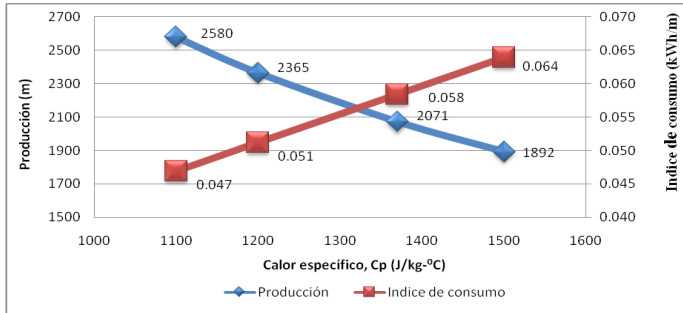


Figura 3. Relación entre producción, calor específico e índice de consumo para 2.2 mm de espesor. Fuente: Elaboración propia, 2022.

Se aprecia en la figura como en la medida que aumenta el calor específico, disminuye la producción y aumenta el índice de consumo energético.

La Figura 4 muestra la relación entre producción, calor específico y las emisiones de CO<sub>2</sub> para 2.2 mm de espesor.

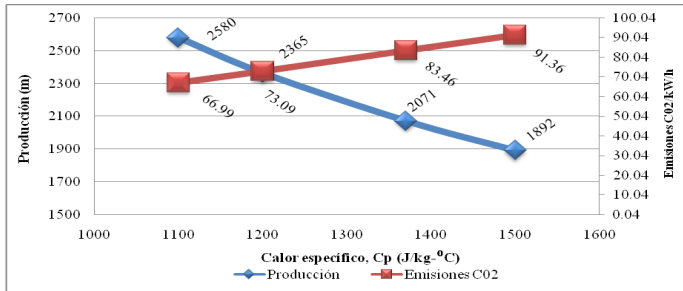


Figura 4. Relación entre producción, calor específico y las emisiones de CO<sub>2</sub> para 2.2 mm de espesor. Fuente: Elaboración propia, 2022.

Se aprecia en la figura como a medida que aumenta el calor específico disminuye la producción que trae consigo el aumento del índice de consumo y por consiguiente las emisiones de CO<sub>2</sub> al medio ambiente.

La Figura 5 muestra la relación entre el tiempo necesario con el calor específico para 2.2 mm de espesor.

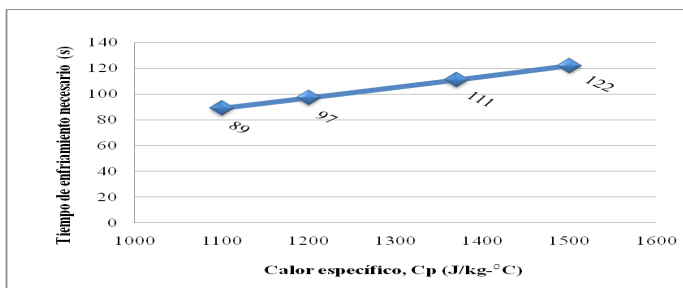


Figura 5 Relación entre el tiempo necesario con el calor específico para 2.2 mm de espesor. Fuente: Elaboración propia, 2022.

Se aprecia como en la medida que aumenta el calor específico aumenta también el tiempo de enfriamiento aumentando con esta relación los índices de consumo energético y las emisiones al medio ambiente.

Siguiendo este mismo procedimiento se obtuvieron para la densidad y la conductividad térmica las siguientes gráficas. Para la densidad (Figura 6):

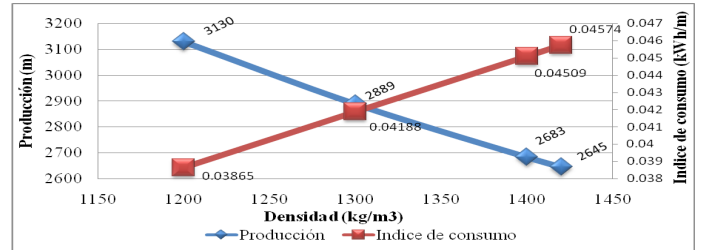


Figura 6. Relación entre producción, densidad e índice de consumo para 1.8 mm de espesor. Fuente: Elaboración propia, 2022.

La figura muestra como en la medida que aumenta la densidad disminuye la producción y aumentan los índices de consumo, en un comportamiento que se asemeja al calor específico, pero con menor sensibilidad.

La Figura 7 muestra la relación entre producción, densidad y emisiones al medio ambiente para 1.8 mm de espesor.

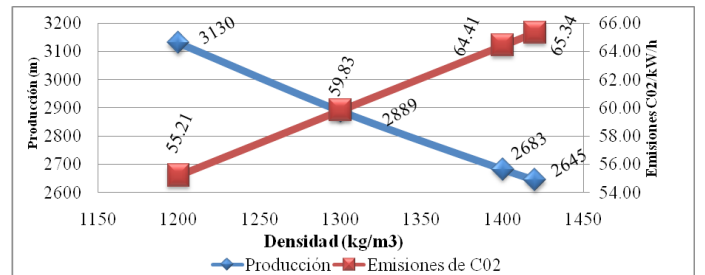


Figura 7. Relación entre producción, densidad y emisiones al medio ambiente para 1.8 mm de espesor. Fuente: Elaboración propia, 2022.

La gráfica muestra como en la medida que aumenta la densidad crecen las emisiones de CO<sub>2</sub> al medio ambiente.

En la Figura 8 se puede observar la relación entre producción y tiempo necesario.

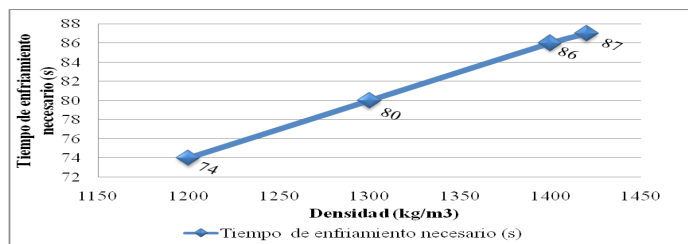


Figura 8. Relación entre producción y tiempo necesario. Fuente: Elaboración propia, 2022.

El tiempo necesario para la producción crece en la medida que aumenta la densidad, por lo que aumentan también los índices de consumo, las emisiones al medio ambiente y disminuye la producción. Comportamiento para la conductividad térmica.

En la Figura 9 se puede observar la relación producción y el índice de consumo para 2.7 mm de espesor.

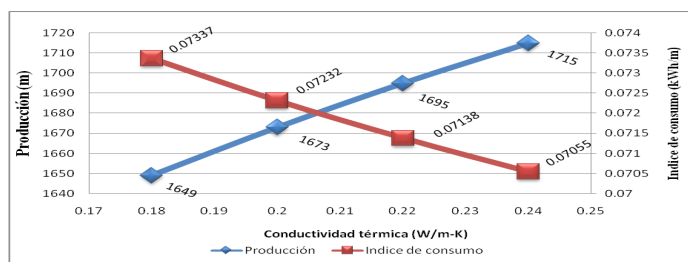


Figura 9. Relación producción y el índice de consumo para 2.7 mm de espesor. Fuente: Elaboración propia, 2022.

Se aprecia en la figura como la conductividad térmica tiene un comportamiento en la producción e índices de consumo contrario al calor específico y la densidad pues en la medida que aumenta disminuyen los índices de consumo y aumenta la producción.

En la Figura 10 se puede observar la relación entre producción, conductividad térmica con las emisiones de CO<sub>2</sub> para 2.7 mm de espesor.

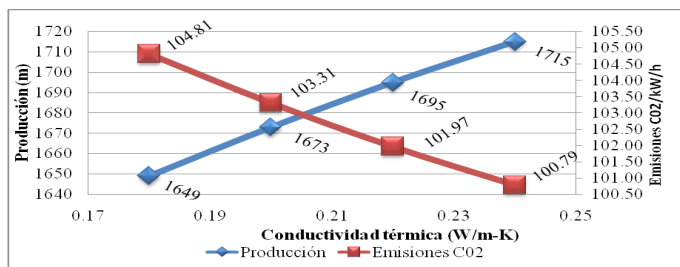


Figura 10. Relación entre producción, conductividad térmica con las emisiones de CO<sub>2</sub> para 2.7 mm de espesor. Fuente: Elaboración propia, 2022.

Muestra como en la medida que aumenta la conductividad térmica disminuyen las emisiones de CO<sub>2</sub> al medio ambiente y se alcanza una mayor producción.

En la Figura 11 se puede observar la relación entre tiempo necesario y la conductividad térmica para 2.7 mm de espesor .

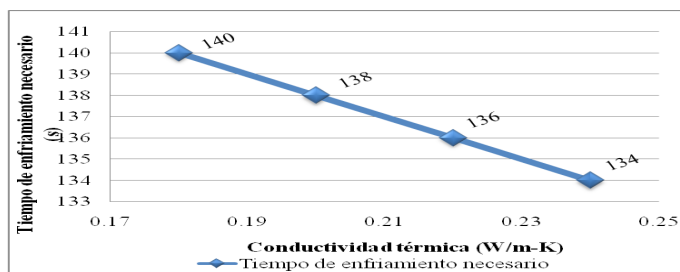


Figura 11 Relación entre tiempo necesario y la conductividad térmica para 2.7 mm de espesor. Fuente: Elaboración propia, 2022.

Se aprecia como en la medida que aumenta la conductividad térmica disminuye el tiempo necesario que implica una disminución de los índices de consumo las emisiones al medio y una elevación de la producción.

En el trabajo fueron aplicados métodos estadísticos según el software Startgraphics Centurion XV que proporcionó un modelo matemático para el cálculo del comportamiento de estas propiedades. ( $\rho$ ,  $C_p$ ,  $K$ ), utilizando



como valores máximos y mínimos los correspondientes al rango normado para estas propiedades en las materias primas utilizadas comercialmente en la Tabla 1.

Considerando como caso de estudio la tubería de 110 mm con espesor 1,8 mm se determina el tiempo de enfriamiento para una máquina de 270 kg/h, según 27 combinaciones de valores de las variables de entrada.

El modelo estadístico de interés que nos proporciona es un modelo de superficie representado por una función, la cual está compuesta por un término constante, términos lineales, términos de interacción entre variables y términos cuadráticos. La expresión matemática puede escribirse como: (ecuación 4)

$$\text{tiempo\_enf} = K_0 + K_1 \cdot \rho + K_2 \cdot Cp + K_3 \cdot k + K_4 \cdot \rho^2 + K_5 \cdot \rho \cdot Cp + K_6 \cdot \rho \cdot k + K_7 \cdot Cp^2 + K_8 \cdot Cp \cdot k + K_9 \cdot k^2 \quad (4)$$

Donde:  $K_0, \dots, K_9$  son los coeficientes de la ecuación y  $\rho, Cp, y k$  son las propiedades físicas de la materia prima definidas en la Tabla 1.

A partir de este modelo se aplica el método de regresión obteniéndose los resultados siguientes (Tabla 4).

Tabla 4 coeficiente de regresión para tiempo de enfriamiento necesario.

$K_0$	457,968
$K_1$	-0,324363
$K_2$	-0,163624
$K_3$	-1187,47
$K_4$	0,0000671258
$K_5$	0,000112311
$K_6$	0,329798
$K_7$	0,0000203056
$K_8$	0,163611
$K_9$	1 106,17

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Puede apreciarse existen tres coeficientes que aportan elementos negativos a la regresión y por tanto la ecuación del modelo de superficie ajustado es: ecuación 5

$$\text{tiempo\_enf} = 457,968 - 0,324363 \cdot \rho - 0,163624 \cdot Cp - 1187,47 \cdot k + 0,0000671258 \cdot \rho^2 + 0,000112311 \cdot \rho \cdot Cp + 0,329798 \cdot \rho \cdot k + 0,0000203056 \cdot Cp^2 + 0,163611 \cdot Cp \cdot k + 1106,17 \cdot k^2 \quad (5)$$

El objetivo que se persigue con esta experimentación es descubrir los efectos individuales y conjuntos que varios factores ejercen sobre el tiempo de enfriamiento en el proceso de extrusión de tuberías plásticas bajo estudio. El resultado del análisis de regresión es el siguiente (Tabla 5):

Tabla 5. Análisis de Varianza para tiempo de enfriamiento necesario.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:p	970,936	1	970,936	157,26	0,0000
B:Cp	3 594,39	1	3 594,39	582,18	0,0000
C:k	98,9356	1	98,9356	16,02	0,0009
AA	3,95823	1	3,95823	0,64	0,4344
AB	73,2602	1	73,2602	11,87	0,0031

AC	14,2136	1	14,2136	2,30	0,1476
BB	3,95823	1	3,95823	0,64	0,4344
BC	11,564	1	11,564	1,87	0,1889
CC	5,94679	1	5,94679	0,96	0,3401
Error total	104,958	17	6,17399		
Total (corr.)	4 882,12	26			

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Para este caso, cuatro efectos tienen un valor-P menor que 0.05 indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%. Estos son los efectos principales para  $\rho$ ,  $C_p$ ,  $k$ , y el efecto de interacción de  $\rho$  y  $C_p$ . El diagrama de Pareto de la figura 12 también muestra estos resultados.

Al aplicar el método de varianza se obtienen los siguientes resultados.

R-cuadrada = 97.8502 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 96.712 por ciento

Error estándar del est. = 2.48475

Error absoluto medio = 1.30731

Estadístico Durbin-Watson = 1.83893 (P=0.2424)

Auto correlación residual de Lag 1 = 0.0237125

En la aplicación de la matriz de correlación para los efectos estimados para el tiempo de enfriamiento necesario muestra el grado de confusión entre los efectos. Para este caso el resultado fue un diseño perfectamente ortogonal pues mostró una matriz diagonal con 1's en la diagonal y 0's fuera de ella. Cualquier término distinto de cero implica que los estimados de los efectos correspondientes a esa fila y columna estarán correlacionados. En este caso, no hay correlación entre ninguno de los efectos. Esto significa que se obtuvieron estimados "limpios" para todos esos efectos (Tabla 6).

Tabla 6 Matriz de correlación para los efectos estimados para el tiempo de enfriamiento necesario.

		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
(1)	promedio	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.5345	0.0000	0.0000	-0.5345	0.0000	-0.5345
(2)	A:Rho	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(3)	B:Cp	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(4)	C:k	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(5)	AA	-0.5345	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(6)	AB	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(7)	AC	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(8)	BB	-0.5345	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
(9)	BC	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000
(10)	CC	-0.5345	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

Fuente: Elaboración propia, 2022.

La siguiente Tabla 7 muestra una facción de las 27 combinaciones del experimento para demostrar el resultado, según los valores obtenidos entre ambos softwares comprobándose la cercanía entre los valores observados que son los obtenidos por el modelo matemático del Wolfram Mathematica 12.3 y el obtenido por el estadístico Startgraphics Centurion XV que son los ajustados, inferior al 95% y superior al 95%.

Tabla 7 Resultados estimados para tiempo de enfriamiento necesario según las 27 combinaciones.

	Observados	Ajustados	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Fila	Valores	Valores	para Media	para Media
1	83,54	83,5445	83,5178	83,5713
2	90,55	90,577	90,5444	90,6097
3	97,01	97,0059	96,9826	97,0292
4	76,52	76,5131	76,4805	76,5458
5	104,35	104,364	104,331	104,396
6	102,53	102,54	102,514	102,567
7	88,98	88,967	88,9403	88,9938
8	90,43	90,4379	90,4111	90,4646
9	105,15	105,163	105,139	105,186
10	87,74	87,7248	87,6922	87,7575
11	98,72	98,7226	98,6993	98,7459
12	82,08	82,0637	82,0404	82,087
13	111,93	111,949	111,926	111,973
14	87,63	87,6306	87,6039	87,6574
15	119,64	119,645	119,613	119,678
16	110,37	110,365	110,338	110,391
17	101,11	101,085	101,052	101,117
18	80,94	80,9506	80,9239	80,9774
19	113,91	113,902	113,875	113,929
20	121,33	121,359	121,332	121,386

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Definición gráfica del comportamiento estadístico del experimento para tiempo de enfriamiento necesario (Figura 12).

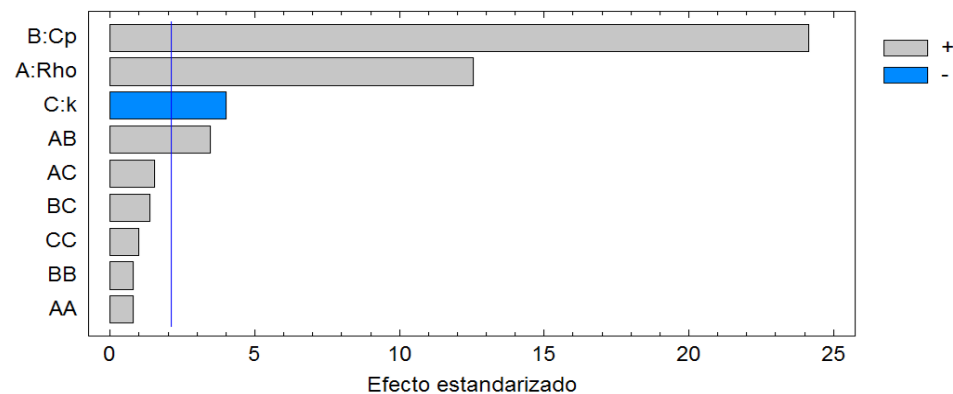


Figura 12 Carta de Pareto estandarizada para tiempo de enfriamiento necesario, muestra como efectivamente el efecto contrario del proceso lo aporta la conductividad térmica. Fuente: Elaboración propia, 2022.

En resumen se aprecian comportamientos diferentes en cada una de las propiedades estudiadas con respecto a la producción, índices de consumo y por consiguientes las emisiones al medio ambiente.

En la Figura 13 se muestra la superficie que ilustra cómo efectivamente, para un valor de  $k$  determinado con valores mínimos de  $C_p$  y de  $\rho$  se consigue el menor tiempo de enfriamiento necesario de la tubería en la bañera y por lo tanto la menor emisión de contaminantes al medio.

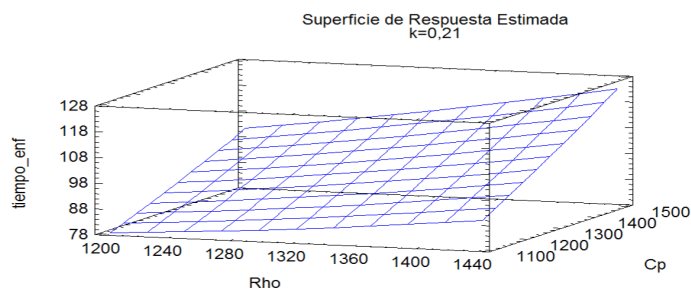


Figura 13 Superficie de respuesta estimada para el tiempo de enfriamiento necesario. Fuente: Elaboración propia, 2022.

La figura anterior muestra la relación que existe entre las propiedades en el proceso con respecto a una conductividad térmica seleccionada, para los tiempos de enfriamiento necesarios. Refleja que en la medida que crece la densidad aumenta el tiempo de enfriamiento necesario en la bañera de enfriamiento como fue descrito en el capítulo anterior, donde se realizó el análisis del comportamiento de esta propiedad, de igual forma sucede con el calor específico que presenta una situación similar, pero como se observa con una mayor sensibilidad en el proceso, en ambos casos en la medida que crecen sus magnitudes aumentan los tiempos de enfriamiento necesarios en la bañera, que conllevan a una disminución de los rendimientos productivos y un aumento en los índices de consumo; ratificando también los resultados del capítulo anterior.

A continuación, se procede a realizar una gráfica de efectos principales como se muestra en la Figura 14, con el fin de interpretar el comportamiento de cada una de las variables en estudio con respecto a la variable independiente y el tiempo enfriamiento necesario, que para este caso define la eficiencia del proceso y ratifica lo planteado; reforzando el concepto de modelo híbrido que contribuye a facilitar los cálculos con el nuevo modelo estadístico.

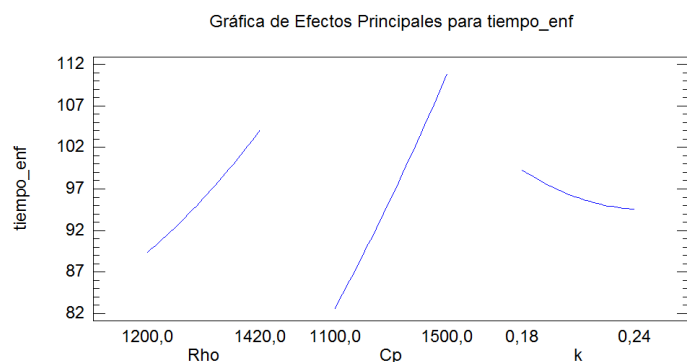


Figura 14 Efectos principales para tiempo de enfriamiento necesario. Fuente: Elaboración propia, 2022.

De la figura anterior se puede interpretar que la variable  $\rho$  tiene un comportamiento creciente según su magnitud con relación al aumento en el tiempo de enfriamiento necesario, lo que significa que a medida que aumenta la densidad del material, se necesita mayor tiempo de enfriamiento para alcanzar la temperatura deseada. El calor específico se comporta de manera similar, un incremento de este conlleva necesariamente al aumento del tiempo de enfriamiento necesario. Sin embargo, un incremento en la conductividad produce un decrecimiento en el tiempo de enfriamiento necesario.

## CONCLUSIONES

El trabajo demuestra como existe un comportamiento diferente en cuanto al tiempo necesario para el enfriamiento en un proceso de extrusión de tuberías plásticas según las temperaturas deseadas en relación con tres elementos fundamentales: la producción, los índices de consumo y las emisiones al medio ambiente a través de las propiedades termofísicas seleccionadas.

El calor específico y la densidad a medida que aumenta su magnitud aumenta el tiempo necesario en la producción y por consiguiente los índices de consumo, provocando un aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> al medio ambiente, el calor específico con una mayor sensibilidad, teniendo la conductividad térmica un comportamiento contrario.

De lo anterior se desprende la importancia de mantener procesos productivos controlados, usando los avances informáticos de la ciencia y la técnica para mejorar la eficiencia de estos procesos y sobre todo los vinculados directamente con la energía, pues a corto plazo no se vislumbra una solución totalmente renovable de estas fuentes y aunque así sea la eficiencia es la mejor forma de ahorro; logrando mejores resultados en la protección al Medio Ambiente.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bollaín, C., & Vicente, D. (2021). Presencia de microplásticos en aguas y su potencial impacto en la salud pública. *Revista Española Salud Publica Madrid*. ISSN 1135-5727, 93(7), 1-3. [https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1135-57272019000100012](https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57272019000100012)
- Heesen, O., & Wortberg, J. (2015). A new possibility of melt cooling in extrusion dies to prevent sagging-effects in thick-walled pipes. *University of Duisburg-Essen, Institute of Product Engineering (IPE)*. <https://doi.org/10.1063/1.4873749>.

- Hiesgen, G., Saul, K., & Rauwendaal, C. (2016) Temperature Induced Dimensional Variation in Extrusion Proceedings of the Regional Conference Graz 2015. *Polymer Processing Society PPS AIP Conf. Proc.* 1779. <https://doi.org/10.1063/1.4965475>.
- ISO 50001. (2011) Sistema de Gestión Energética. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:50001:ed-1:v1:es:fig>.
- ISO 50002. (2014) Requisitos del proceso de realización de una auditoría energética en relación con la eficiencia energética [www.intecya.com](http://www.intecya.com) > internacional.
- Jaén, M., Esteve, P., & Banos, I. (2019). Los futuros maestros ante el problema de la contaminación de los mares por plásticos y el consumo. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 16(1), 15, ISSN 0187-893X. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-893X2021000200021&script=sci\\_arttext\\_plus&lng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-893X2021000200021&script=sci_arttext_plus&lng=es)
- Jiménez, R., Borroto N, Montesino, M., Gómez, S., & Jiménez, S. Y. (2015) Mejoramiento de la eficiencia Energética en los procesos de extrusión de tuberías plásticas. *Ingeniería Energética* ISSN 1815 – 5901.
- Jiménez, R. A., Puerta, F. J. F., Gómez, S. J. R. & Jiménez, S. Y. (2017) El Wolfram Mathematica aplicado al método de la solución exacta para procesos de extrusión. *Revista Ingeniería Energética, CUJAE*. ISSN 1815-5901.
- Jiménez, R. A., Puerta, F. J. F., Gómez, S. J. R. & Jiménez, S. Y. (2018) Influencia de las propiedades de la materia prima en el desempeño del proceso de extrusión. *Revista de Ingeniería Energética CUJAE, 2019, 40(1)*. ISSN 1815-5901 RNPS- 1958.
- Jiménez, R. A., Puerta, F. J. F., Gómez, S. J. R. & Jiménez, S. Y. (2019) Diseño de experimento virtual para enfriamiento de tuberías plásticas de cloruro de polivinilo. *Revista de Ingeniería Energética, 40(3)*. ISSN 1815-5901 RNPS-1958.
- Krsti , A., & Nikoli , D. (2018). A Taguchi Approach on Optimal Process Control Parameters for PVC Pipe. *International Journal of Advance Research and Innovation, 6(4)*. ISSN 2347-3258.
- Plan de Negocios. (2019) Sector de Plásticos Colombia. Visión a 2032. <https://www.colombiaproductiva.com/ptp-capacita/publicaciones/sectoriales/publicaciones-plasticos-y-pinturas/plan-de-negocio-industria-de-plasticos-2019-2032>.
- Quevedo, Y., Portela, L., Cabrera, E. N., & Mata, M. (2021). Sostenibilidad de cadenas productivas: precisiones teóricas. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(6), 461-470.
- Rahman, S., Tahiduzzaman, Rupom, S. M., Jewel, N. & Karim J, R. (2018) Waste Identification in A Pipe Manufacturing Industry through. *Journal of Applied Research on Industrial Engineering, 5(4)*, 306–323. <https://www.journal-aprie.com>.
- Tim, A. O., Aquite, W., Ramírez, D., López, L., Puentes J. & Pérez, C. (2012) Retos en la Industria del procesamiento de plásticos y compuestos. *Dyna*, 79(175) ISSN:0012-7353. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49624956005>.
- Vargas, C. A., Posada, J. C., Jaramillo, L. Y., & García, L. A.(2015). Consumos de energía en la industria del plástico: revisión de estudios realizados. *CEA, 1(1)* ISSN 2390-0725.
- Velázquez, G. (2020). El costo de un kilowatt hora **Oficina Nacional para el Control del Uso Racional de la Energía**. <https://www.unionelectrica.cu>.
- Vinueza, C., Meneses, K., & Cuesta, G. (2021). América Latina: ¿Un paraíso de la contaminación ambiental? *Revista de Ciencias Ambientales (Trop J Environ Sci)*, e-ISSN: 2215-3896, 55(2), 1-18. <https://doi.org/10.15359/rca.55-2.1>
- Wesley, J. (2012) Polymer Extrusion Cooling for the 21st Century. *Magazine NOVATEC part of the maguire family*.

## ANEXO 1

Tabla 1.1 Producción de plásticos mundo y países. 2018-2032.

	2018	2020	2025	2032	CAGR 18-32
<b>Mundo</b>	\$2.455	\$2.740	\$3.875	\$6.498	7,2%
<b>Estados Unidos</b>	\$269	\$285	\$300	\$335	1,6%
<b>China</b>	\$963	\$1.142	\$1.892	\$3.646	10%
<b>Alemania</b>	\$123	\$128	\$148	\$180	2,8%
<b>Reino Unido</b>	\$32	\$33	\$35	\$37	0,9%
<b>México</b>	\$19	\$21	\$27	\$41	5,8%
<b>Brasil</b>	\$36	\$38	\$48	\$64	4,3%
<b>Colombia</b>	\$6	\$7	\$9	\$14	5,2%

Fuente: Plan de Negocios Colombia visión a 2032 (2019).

La tabla muestra a nivel mundial el tamaño de mercado del sector de plásticos que es de \$2.865 billones de dólares, impulsado principalmente por la región de Asia, que tiene un crecimiento CAGR de 10%, por encima del crecimiento mundial de 6,3%. Históricamente la región con mayor crecimiento de mercado Global es Asia Pacífico, con un CAGR (18 años) de 9,7% (3 puntos por encima de la tasa mundial). Algunos factores que contribuyeron a este rápido crecimiento (véalo en el anexo 4) y Producción mundial de plástico.

## ANEXO 2. Factores que contribuyeron a un rápido crecimiento en la producción de plástico.

Aumento de demanda de productos de plástico de China derivada de la creciente población, alta urbanización y bajos costos de producción.

Incremento de las capacidades de producción de India e Indonesia, resaltando el crecimiento de los sectores de automóviles, aviación, y construcción.

Innovaciones de países como Japón y Corea del Sur, en la industria de Aviación, sobre todo en aeronaves de defensa militar.

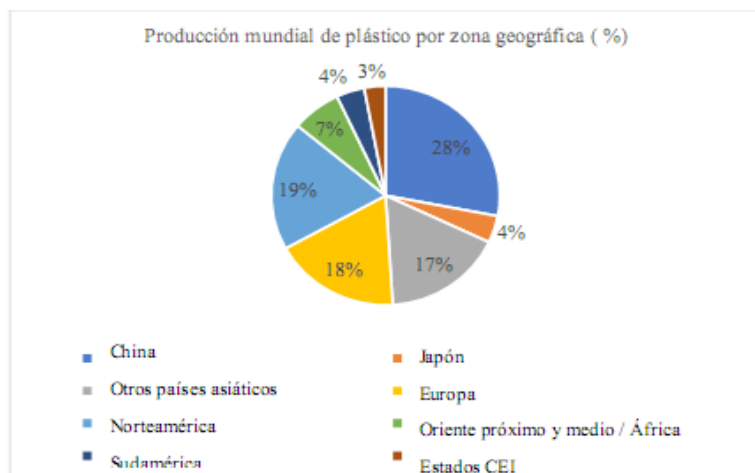
La dependencia de otros países en las importaciones de alimentos que genera un crecimiento constante en el consumo de empaques de plástico.

Por otra parte, Latinoamérica es la segunda región con mayor crecimiento del sector, con un CAGR de 5,6%. A pesar de las adversidades económicas de la región: bajos crecimientos de las economías de Brasil y Argentina, caída de la industria en Venezuela, entre otros. Se proyecta un buen potencial para la región impulsado por los sectores automotrices en Brasil y Argentina, Construcción en Chile y Colombia, y del subsector de empaques en Colombia (Plásticos rígidos y flexibles).

Europa es la tercera región con mayor crecimiento, con un CAGR (18 años) de 3,4 %, impulsado por los crecimientos de Alemania, Reino Unido, Italia y Francia, en producción de artículos de plástico para sectores como construcción, automóviles y dispositivos médicos.

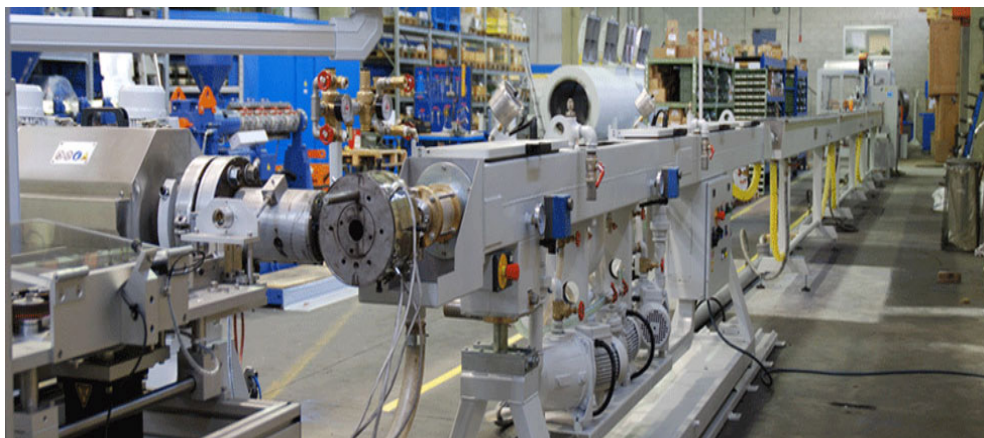
Norte América tiene un crecimiento de 1,8% en los últimos 18 años, derivado de las fluctuaciones de la economía de Estados Unidos principalmente, como la recesión del 2009, valorización del dólar entre 2014 y 2016, diseño de políticas proteccionistas que afectaron las importaciones y exportaciones de sus principales socios comerciales como China y México, fuerte incremento de la competencia interna. Norte América se caracteriza por sus altos avances

tecnológicos en el sector manufacturero, y su crecimiento es impulsado por las aplicaciones del plástico en sectores como automóviles, empaques y construcción.



ANEXO 3. Producción mundial de plástico por zonas geográficas. Fuente: Elaboración propia, 2022.

Tomado de Peña, Ortiz, N. C. (2019). Evolución de los determinantes de la innovación en el sector de plásticos en Colombia 2009-2016. Trabajo de grado para obtener el título de MAGÍSTER EN GERENCIA ESTRATÉGICA Universidad de la Sabana. Fuente: Construcción con información de Interempresas (2017).



ANEXO 4. Extrusora actual. Fuente: Elaboración propia, 2022.