



APLICACIÓN DE LA COMPUTACIÓN

Diseño de experimento virtual para enfriamiento de tuberías plásticas de cloruro de polivinilo

Design of virtual experiment for cooling plastic pipes of polyvinyl chloride

Antonio Jiménez Ramos¹, Julio Rafael Gómez Sarduy², Juan Francisco Puerta Fernández², Yulier Jiménez Santana³

¹Director General Empresa de Producciones Plásticas Vasil Levski, Cienfuegos. Cuba

²Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos. Cuba

³Universidad de Guanajuato, México

E-mail: antonio@petrocasa.cu

Recibido: febrero del 2019

Aprobado: mayo del 2019

Licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional.



RESUMEN / ABSTRACT

La experimentación es un método que contribuye a corroborar resultados obtenidos en los diferentes procesos que se desarrollan en la industria, para este caso el objetivo del análisis estadístico es encontrar la relación matemática existente entre el tiempo mínimo requerido para el enfriamiento en el proceso de extrusión de tuberías plásticas, hasta lograr una temperatura deseada según las diferentes propiedades de la materia prima seleccionada que influyen en él. El modelo obtenido es el principal resultado que permitirá, de manera más sencilla estimar ese tiempo. El diseño del experimento virtual, toma como valores a considerar los datos obtenidos y publicados en ediciones anteriores. La ventaja del trabajo es que se puede manipular activamente el sistema que se está estudiando, para generar pocos datos que ofrezcan una información de alta calidad sin necesidad de experimentarlo todo, logrando parámetros que se ajustan a las necesidades de la producción e índices de consumo.

Palabras clave: Diseño de experimento virtual, extrusión de plástico, enfriamiento de tuberías, cloruro de polivinilo, índice de consumo.

Experimentation is a method that contributes to corroborate results obtained in the different processes that are developed in the industry, for this case the objective of the statistical analysis is to find the existing mathematical relationship between the minimum time required for cooling in the process of extrusion of plastic pipes, until achieving a desired temperature according to the different properties of the selected raw material that influence it. The model obtained is the main result that will allow more easily estimate that time. The design of virtual experiment, takes as values to consider the data obtained and published in previous editions. The advantage of the work is that You can actively manipulate the system under study to generate few data that offer high quality information without needing to experience everything, achieving parameters that fit the needs of production and consumption rates.

Keywords: *Experiment design virtual, plastic extrusion, pipe cooling, consumption rates, and polyvinyl chloride.*

INTRODUCCIÓN

Los diseños de experimentos son muy usados en las condiciones actuales pues crean modelos que viabilizan la toma de decisiones que por métodos tradicionales demorarían mucho tiempo y esto atenta contra un resultado de eficiencia y eficacia. Generalmente aún en los modelos más rigurosamente formulados, habrá que investigar algunas relaciones e influencias desconocidas. En este caso el diseño de experimento tiene como objetivo, conocer y con ello corroborar el comportamiento que cada una de las variables en investigación (calor específico, densidad y conductividad térmica) tienen durante el proceso de enfriamiento en los procesos de extrusión para con este conocimiento lograr mejores resultados en los procesos de producción y un mejoramiento en los índices de consumo, corroborando así otros estudios realizados al respecto por otros métodos ya utilizados y publicados en artículos anteriores en esta revista [1-4].

Así como otras publicaciones, pues los procesos de extrusión han sido estudiados con diferentes enfoques de mejoramiento en dependencia de los objetivos pretendidos por cada autor, centro de investigación, normalizativo, academias u otros [5-8], aplicando en cada uno de ellos diferentes sistemas computacionales y estadísticos con los cuales se ha contribuido a hacer menos engorroso el control de los procesos [9-12].

Para el diseño de experimento se utilizó el Startgraphics Centurion XV. Es una potente herramienta de análisis de datos que combina una amplia gama de procedimientos analíticos con extraordinarios gráficos interactivos para proporcionar un entorno integrado de análisis que puede ser aplicado en cada una de las fases de un proyecto, desde los protocolos de gestión Six Sigma hasta los procesos de control de calidad, Incluye funciones estadísticas avanzadas, capaces de proporcionar rigurosos análisis propios de los profesionales estadísticos más exigentes y experimentados y al mismo tiempo ofrece una interface muy intuitivo, con funciones de asistencia exclusivas, de tal forma que proporciona la simplicidad suficiente para permitir a un analista inexperto realizar procedimientos complejos.

DESARROLLO

En este caso es aplicado:

Diseño factorial

El diseño factorial permite el estudio simultáneo de los efectos de varios factores que pueden existir en una respuesta. Cuando se mejora un experimento guía, se mejora el nivel de todos simultáneamente, permitiendo a la vez el estudio o interacción entre ellos. En los gráficos se puede observar como cada punto representa una combinación única de niveles de factor, también se puede hacer una corrida de diseño de factores completos (que son todas las combinaciones de los niveles del factor experimental) ó una fracción del diseño factorial (son medidas de respuestas a un subgrupo fracción de todas las combinaciones de los niveles del factor experimental).

Diseño de experimento factorial completo

Para el desarrollo del diseño de experimento factorial completo o multinivel, se utilizó el programa estadístico Statgraphics, que generó un diseño de 3 niveles a partir de los valores de entradas correspondientes a los 3 factores experimentales ρ , $cp.$, k , (densidad, calor específico y conductividad térmica) utilizando como valores máximos y mínimos los correspondientes a la tabla 1, materias primas utilizadas comercialmente.

A continuación, se muestra en la tabla 2, la corrida del diseño de experimento factorial completo con los valores máximos y mínimos de 1 y -1 respectivamente y tres niveles para cada factor considerado.

Tabla 1. Propiedades de algunas materias primas utilizadas comercialmente.

ρ = (densidad del material kg/m ³)	K= (conductividad térmica W/m ^o K)	Cp. =(calor específico J/kg ^o C)
1420	0.24	1500
1420	0.22	1260
1400	0.21	1370
1300	0.20	1300
1200	0.18	1100

Tabla 2. Hoja de trabajo para diseño de experimento.

corrida	Factor A	Factor B	Factor C
1	1,0	1,0	0,0
2	1,0	1,0	-1,0
3	0,0	0,0	0,0
4	-1,0	-1,0	0,0
5	0,0	1,0	1,0
6	1,0	1,0	1,0
7	-1,0	1,0	1,0
8	0,0	-1,0	-1,0
9	-1,0	0,0	1,0
10	-1,0	1,0	0,0
11	1,0	0,0	0,0
12	0,0	1,0	-1,0
13	1,0	-1,0	1,0
14	-1,0	0,0	0,0

Continuación de la tabla 2			
15	0,0	0,0	-1,0
16	-1,0	-1,0	1,0
17	1,0	0,0	1,0
18	1,0	-1,0	-1,0
19	0,0	-1,0	0,0
20	-1,0	0,0	-1,0
21	0,0	1,0	0,0
22	0,0	-1,0	1,0
23	-1,0	-1,0	-1,0
24	1,0	0,0	-1,0
25	-1,0	1,0	-1,0
26	1,0	-1,0	0,0
27	0,0	0,0	1,0

METODO UTILIZADO

El método utilizado es el de generación de datos, a partir de las características de algunas materias primas utilizadas en el proceso de extrusión de tuberías de PVC (cloruro de polivinilo) tabla 1, de los propios resultados del diseño de experimento realizado, para sus 27 combinaciones de valores (máximos, medios y mínimos) tabla 2, determinándose el tiempo de enfriamiento para las combinaciones de valores de las variables de entrada, mediante la aplicación de una combinación de datos aportados por el Statgraphics y el Wolfram Mathematica, según las leyes de la transferencia de calor que aportan para cada corrida el cálculo del tiempo de enfriamiento, utilizando como caso de estudio la tubería de diámetro 110 mm, espesor 1.8 mm como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Hoja de trabajo con las corridas experimentales realizadas acordes al diseño experimental.

<i>corrida</i>	<i>Rho</i>	<i>Cp</i>	<i>k</i>	<i>tiempo enf</i>
1	1310,0	1100,0	0,18	83,54
2	1420,0	1100,0	0,18	90,55
3	1310,0	1300,0	0,21	97,01
4	1200,0	1100,0	0,18	91,13
5	1200,0	1500,0	0,18	104,35
6	1200,0	1500,0	0,21	102,53
7	1420,0	1100,0	0,21	88,98
8	1200,0	1300,0	0,18	90,43
9	1420,0	1300,0	0,21	105,15
10	1420,0	1100,0	0,24	87,74
11	1310,0	1300,0	0,18	98,72
12	1310,0	1100,0	0,21	82,08
13	1310,0	1500,0	0,21	111,93
14	1200,0	1300,0	0,24	87,63
15	1420,0	1500,0	0,24	119,64
16	1310,0	1500,0	0,24	110,37
17	1200,0	1500,0	0,24	101,11
18	1310,0	1100,0	0,24	80,94
19	1310,0	1500,0	0,18	113,91
20	1420,0	1500,0	0,21	121,33
21	1200,0	1100,0	0,24	74,14
22	1200,0	1100,0	0,21	75,19
23	1200,0	1300,0	0,21	88,86
24	1420,0	1500,0	0,18	123,48
25	1420,0	1300,0	0,24	103,69
26	1310,0	1300,0	0,24	95,66
27	1420,0	1300,0	0,18	107,01

Modelo estadístico obtenido

El modelo estadístico de interés 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: Vea la ecuación (1).

$$\text{Tiempo de enfriamiento} = K_0 + K_1 \cdot \rho + K_2 \cdot Cp + K_3 \cdot k + K_4 \cdot \rho^2 + K_5 \cdot \rho \cdot Cp + K_6 \cdot \rho \cdot k + K_7 \cdot Cp^2 + K_8 \cdot Cp \cdot k + K_9 \cdot k^2 \quad (1)$$

Donde:

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

Los resultados de la regresión utilizando el Statgraphics son los siguientes: Vea la tabla 4.

Tabla 4. Coeficiente de regresión para tiempo de enfriamiento

Coeficiente	Estimado
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	1106,17

La ecuación del modelo de superficie ajustado es: Vea la ecuación (2).

$$\begin{aligned} \text{Tiempo de enfriamiento} = & 457,968 - 0,324363 \cdot \rho - 0,163624 \cdot Cp - 1187,47 \cdot k + 0,0000671258 \cdot \rho^2 \\ & + 0,000112311 \cdot \rho \cdot Cp + 0,329798 \cdot \rho \cdot k + 0,0000203056 \cdot Cp^2 + 0,163611 \cdot Cp \cdot k + 1106,17k^2 \end{aligned} \quad (2)$$

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

Influencia de los diferentes factores sobre el tiempo de enfriamiento.

El objetivo de esta experimentación fue 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: Vea la tabla 5.

Análisis de Varianza para tiempo de enfriamiento.

Tabla 5. Influencia de los diferentes factores sobre el tiempo de enfriamiento.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:p	970,936	1	970,936	157,26	0,0000
B:Cp	3594,39	1	3594,39	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.)	4882,12	26			

R-cuadrada = 97,8502 porciento
 R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 96,712 porciento
 Error estándar del estudio = 2,48475
 Error absoluto medio = 1,30731
 Estadístico Durbin-Watson = 1,83893 (P=0,2424)
 Auto correlación residual de Lag 1 = 0,0237125

La tabla ANOVA (tabla 5), particiona la variabilidad de tiempo de enfriamiento en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 4 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 ρ , C_p , k , y el efecto de interacción de ρ y C_p . El diagrama de Pareto de la figura 1, también muestra estos resultados. El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, explica 97,8502% de la variabilidad en tiempo de enfriamiento. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 96,712%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 2,48475. El error medio absoluto (MAE) de 1,30731 es el valor promedio de los residuos.

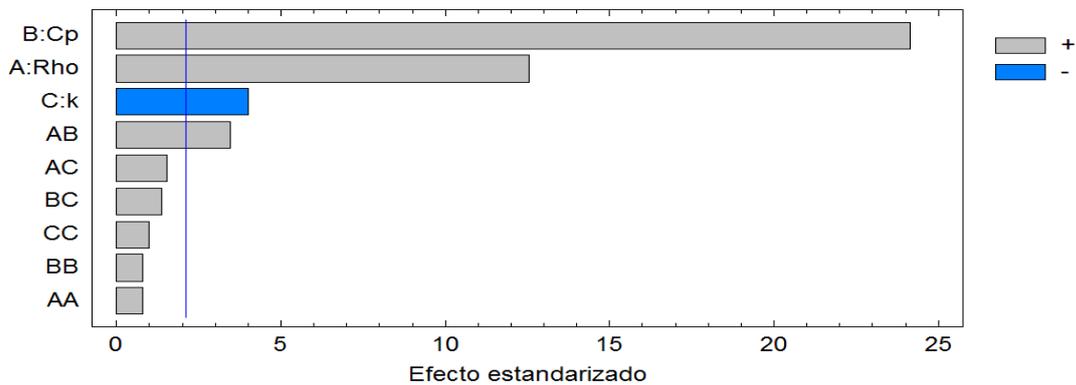


Fig. 1. Carta de Pareto estandarizada para el tiempo de enfriamiento.

Es de interés obtener las superficies de respuesta del modelo para estas propiedades físicas de la materia prima determinada, para identificar la existencia de un mínimo en el tiempo de enfriamiento. En la figura 2, se muestra la superficie que ilustra cómo efectivamente, para un valor de k determinado con valores mínimos de C_p y de ρ se consigue el menor tiempo de enfriamiento de la tubería.

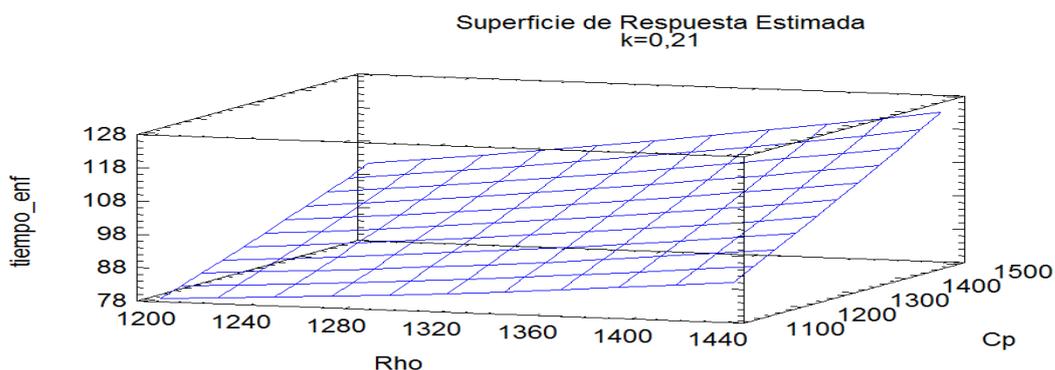


Fig. 2. Superficie de respuesta estimada.

A continuación, se procede a realizar una Gráfica de Efectos Principales como se muestra en la figura 3, con el fin de interpretar el comportamiento de cada una de las variables en estudio con respecto a la variable independiente, tiempo de enfriamiento.

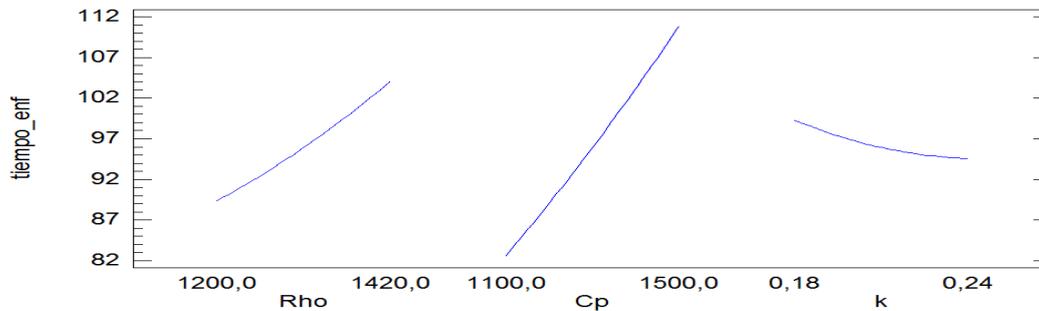


Fig. 3. Gráfica de Efectos Principales para tiempo de enfriamiento.

De la figura anterior se puede interpretar que:

La variable ρ tiene un comportamiento creciente con relación al tiempo de enfriamiento 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 (C_p) se comporta de la misma forma, o sea, un incremento de este conlleva necesariamente al aumento del tiempo de enfriamiento.

Todo lo contrario existe con respecto a la conductividad térmica, pues en la medida que aumenta disminuye el tiempo de enfriamiento.

Con estos mismos principios se realizaron análisis similares para distintos surtidos de tuberías que corroboran el análisis de sensibilidad realizado, teniendo en general un comportamiento como el que se aprecia en la figura 4, que representa un resultado interactivo entre ambos software, en el caso del Wolfram Mathematica se obtiene a través del método de la solución exacta de la transferencia de calor, aplicado a las coordenadas cilíndricas para régimen transitorio, desarrollo que fue publicado anteriormente y cuya solución general del problema fue después de aplicado el procedimiento de cálculo, una combinación lineal de infinitas soluciones, para los infinitos auto valores de λ . Vea la ecuación (3).

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

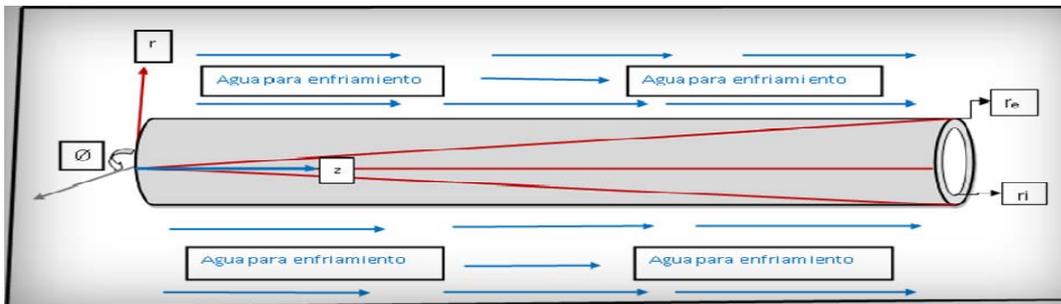


Fig. 4. Comportamiento del enfriamiento de un perfil extruido según la modelación matemática obtenida, entre el Wolfram Mathematica y el Statgraphics.

Representa el tiempo de enfriamiento en función de las temperaturas adimensionales y los radios en la bañera donde $z=y=0$ y $r \neq 0$, refleja el comportamiento de la energía calorífica entre el agua de enfriamiento y el perfil extruido, según las propiedades del material utilizado, indica la dirección en la cual se emite la mayor cantidad de calor (r), la dirección en la cual se desplaza el tiempo (t) según una combinación lineal de infinitas soluciones de intervalos para los infinitos auto valores λ_n , hasta alcanzar el equilibrio térmico a la salida de la bañera.

CONCLUSIONES

1-. Fue corroborado el comportamiento que cada una de las variables tiene durante el proceso de enfriamiento en los procesos de extrusión según la interrelación de los software aplicado, lo cual puede contribuir a un mejoramiento en los índices de consumo y productivo.

2-. Pudo apreciarse para una superficie de respuesta estimada con una conductividad térmica constante el nivel de sensibilidad que tiene el comportamiento del calor específico y la densidad, el primero presenta una mayor sensibilidad con relación a un mismo tiempo de enfriamiento.

REFERENCIAS

- [1] Rama Sarojinee, Manoj Kumar Jha. "*Genetically tuned optimization of plastic extrusion process: A literature Review*". IJISSET- International Journal of Inovative Science, Ingeneering and technology, 2018, v.5, n.2, ISSN (Online) 2348-7968 [consulta 9 de diciembre de 2018]. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiZsryl6ZPjAhUPm-AKHQ3-AKgQFjAAegQIBBAC&url=http%3A%2F%2Fijiset.com%2Fvol5%2Fv5s2%2FIJISSET_V5_I02_08.pdf&usg=AOvVaw1hlXsH3SIKOiSL7Glq48i1
- [2] Solomon Kerealme, et al. "*Parameter Optimization of Extrusion Machine producing UPVC pipes using Taguchi Method: A case of Amhara pipe factory*". Faculty of mechanical and Industrial Engineering. 2016, v.5, ISSN:2278-0181[consulta 16 de febrero de 2018].Disponible en: www.ijert.org.
- [3] Mukesh Kumar Verma, Mukesh Dubev. "*Optimization of process parameters plastic estrusion in pipe Manufacturing*". International Journal of engineering and management research, january 2019 v.8, n.1.ISSN: 2278-0181, [consulta 11 de noviembre de 2018]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/332901655_Optimization_of_Process_Parameters_in_Extrusion_of_PVC_Pipes_using_Taguchi_Method
- [4] J G Khan, Rs Dalu. "*Defects in extrusion process and their impact on product quality*".International Journal of mechanical ingeneering and robotics research, 2014, v. 3, n.3, ISSN 2278-0149 [consulta 18 de octubre de 2018]. Disponible en: https://scholar.google.com/cu/scholar?q=Defects+in+extrusion+process+and+their+impact+on+product+quality&hl=es&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholar
- [5] Antonio Jiménez Ramos, et al. "*Influencia de las propiedades de la materia prima en el desempeño del proceso de extrusión*" "Revista de Ingeniería Energética, 2019, v. 40, n. 1, enero/abril, p. 213-222 Centro de Investigación y Pruebas Electroenergéticas, Facultad de Ingeniería Eléctrica. Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría, Cujae, ISSN 1815-5901 RNPS- 1958. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012019000100073
- [6] Antonio Jiménez Ramos, et al. "*Mejoramiento de la eficiencia energética en los procesos de extrusión de tuberías plásticas*" en Ingeniería Energética, 2015, v. 36, n.2, p.220-229, Mayo /Agosto, ISSN 1815 – 5901. [consulta 15 de febrero de 2018].Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012015000200011
- [7] JIMENEZ RAMOS, Antonio, et al., "*Wolfram Mathematica, ``Aplicado a la transferencia de calor método solución exacta para procesos de extrusión``*". En Ingeniería Energética, 2017, v. 38, n. 1 p. 73-84, Enero/Abril, ISSN 1815-5901 RNPS-1958. [consulta 9 de febrero de 2018]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1815-59012017000100009
- [8] Jim Frankland. "*Sistemas de enfriamiento: en elemento crítico en extrusión*".Plastics Technolog, México, 2015. [Consulta 12 de julio de 2018] Disponible en: <https://www.pt-mexico.com/columnas/sistemas-de-enfriamiento-en-elemento-crtico-en-extrusin>
- [9] Zhunio Vega y José Miguel. "*Elaboración de un sistema informático para el control estadístico del proceso en la fabrica de tubos Plásticos Rival Cuenca*". Ecuador, 2015. [Consulta 4 de noviembre 2018]. Disponible en: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/24480>
- [10] C. Andrés Vargas Isasa, et al., "*Consumo de energía en la Industria del plástico: Revisión de estudios realizados*". Revista CEA/ 7005- 1520, 2 PB. Pdf. v. 1, n. 1, junio de 2015, p-93-107, pág. 3-7, [consulta 10 de noviembre de 2018]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/305222155_Consumo_de_energia_en_la_industria_del_plastico_revision_d_e_estudios_realizados. DOI: [10.22430/24223182.70](https://doi.org/10.22430/24223182.70)
- [11] Oswaldo, Tim A., et al. "*Retos en la Industria del procesamiento de plásticos y compuestos*" , Universidad Nacional de Colombia. Dyna, octubre 2012, v. 79, n. 175, p. 20-28, [consulta 8 de abril de 2018]. Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49624956005>. ISSN: 0012-7353
- [12] García G., J.J. y Rentería Rodríguez, E. (2013). "*Resolver Problemas: Una estrategia para el Aprendizaje de la Termodinámica*". En Revista Científica Guillermo de Ockham v.11, n 2, julio-diciembre 2013, p. 117-134, Universidad de Sanbuenaventura Cali Colombia [consulta 23 de noviembre de 2018] Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=105329737009>. ISSN 1794-192X.