

## DISEÑO DE UN PROTOTIPO DIDÁCTICO DE MÁQUINA SOPLADORA DE PLÁSTICO NEUMÁTICA

### DESIGN OF A PROTOTYPE OF TEACHING PLASTIC MACHINE AIR BLOWER

<sup>1</sup>Ernesto Ramiro Santillán , <sup>2</sup>Mario Jiménez León, <sup>3</sup>Xavier Masapanta A., <sup>4</sup>Esteban Gavilanes V.

<sup>1,2</sup> Universidad de Fuerzas Armadas ESPE – Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Quijano y Ordoñez y Marques de Maenza s/n.

<sup>3</sup>Asesoría en electromecánica <sup>4</sup>SURMAQ S.A. Quito.

E-mails: <sup>1</sup>ersantillan@espe.edu.ec , <sup>2</sup>mpjimenez@espe.edu.ec , <sup>3</sup>masapanta86@gmail.com , <sup>4</sup>esteban\_d12@hotmail.com

*Energía Mecánica Innovación y Futuro, IV Edición 2015, No.1 (13)*

### RESUMEN

El artículo presenta el diseño de un prototipo didáctico de máquina sopladora de plástico, para obtener recipientes pequeños de polietileno de alta densidad conformados por el soplado en matrices. Se estima las especificaciones de la máquina, con el análisis modular se determina las funciones del prototipo obteniendo varias alternativas de solución para cada función, realizando el análisis cuantitativo y comparando entre si las diferentes alternativas con los criterios que se establecen según el nivel de importancia, a través de la ponderación se llegan a la mejor solución.

Establecidas las especificaciones técnicas y la morfología de la máquina se diseñan los elementos mecánicos, con el uso de software de la especialidad, considerando un análisis térmico, estático y vibratorio del tornillo extrusor, eje del cabezal y base soporte para determinar su comportamiento a las condiciones del trabajo, y la selección del control eléctrico y electrónico de los

parámetros de funcionamiento del prototipo

**Palabras clave:** Polietileno, máquina sopladora, plástico, análisis térmico.

### ABSTRACT

The paper presents the design of a training prototype plastic blowing machine, for small containers of high density polyethylene formed by the blown matrices. The specifications of the machine is estimated, with the modular prototype analysis functions is determined by obtaining several alternative solutions for each function, performing quantitative analysis and comparing each different alternatives with the criteria set by level of importance, through the weighting you reach the best solution.

Established specifications and type of machine elements are designed, using specialty software, thermal; static and vibration analysis is performed to determine the right material for each item.

**Keywords:** *Polyethylene, blowing machine, plastic, thermal analysis*

## 1. INTRODUCCIÓN

El diseño de máquinas es una base teórica incluye estudios prácticos en un tema que día a día toman mayor importancia en la industria.

Se utiliza la metodología del diseño concurrente utilizando la casa de calidad que considera las especificaciones técnicas del prototipo, el análisis funcional y la solución más adecuada de entre varias alternativas para el diseño de la máquina [1].

Se realiza el diseño mecánico del tornillo extrusor; utilizando software de aplicación para análisis térmico y estático de los elementos más críticos de la máquina como: tornillo extrusor, eje del cabezal. Está considerado el estudio vibratorio de la base de la extrusora, seleccionando los dispositivos eléctricos, electrónicos, neumáticos, tablero de control de cual consta la máquina.

## 2. DESARROLLO

El proceso de moldeo por soplado consiste en adquirir una manga tubular de polietileno plastificado (párison) que se produce en la extrusora después de pasar por la boquilla, la que se concentra entre las caras huecas que forman el molde y al suministrar aire a presión obliga al material plastificado a tomar la forma del molde. [1]

De la temperatura de plastificación con la que sale el material de la boquilla depende el tiempo necesario para enfriar la pieza antes de salir del molde. [2]

El llenado correcto de las cavidades del molde depende de la presión de soplado. La presión se ajusta según el tamaño de la pieza y del diseño del molde [3].

Se utiliza la metodología del Diseño concurrente utilizando la casa de calidad, considerando los requerimientos del Laboratorio de Neutrónica y que son transformadas en especificaciones técnicas del prototipo, mediante el análisis funcional y la morfología, se establece la solución más adecuada de entre varias alternativas para el diseño de la máquina [4]. obteniéndose la mejor alternativa de solución: llenado de tolva con un recipiente, la plastificación y dosificado con husillo único, el moldeo con soplado y desmoldeo neumáticamente [3][5].

Para el efecto se realiza el diseño mecánico y térmico del tornillo extrusor; y del eje del cabezal utilizando software CAE para el análisis térmico y estático. Se consideró el estudio vibratorio de la base de la extrusora, y la selección de los dispositivos neumáticos, eléctricos y electrónicos, que conforman la máquina y el tablero de control del prototipo para el control de los parámetros de funcionamiento( velocidad del tornillo extrusor, temperatura de moldeo, presión de soplado, tiempo de soplado) del prototipo como un sistema didáctico

En la figura 1 se indica el proceso de moldeo por soplado

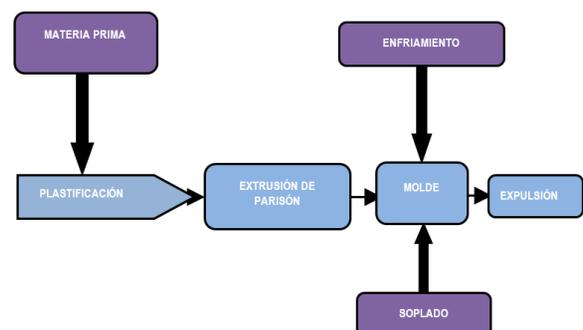


Figura 1. Proceso de molde por soplado

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

Las especificaciones técnicas de la máquina se determinan siguiendo el Diseño Concurrente, según Riba [4] y que se indican en la tabla 1

Tabla 1. Especificaciones Técnicas de la Máquina

Empresa Cliente:		Fecha Inicial: 15/02/2015	
Universidad de las Fuerzas Armadas		Última revisión:	
Diseñadores:		Producto	
Esteban Gavilanes Vázquez Xavier Masapanta Ayala		Prototipo de máquina sopladora de plástico por molde	
		Página 1	
Especificaciones			
Concepto	Fecha	Propone	R/D
Descripción			
Función		C	R
Prototipo de Máquina de molde por soplado para prácticas industriales. Fabricación de 152 unidades por hora.			
Presión mínima y máxima de cilindros		D	R
Presión mínima de 2 Bares Presión máxima de 8 Bares			
Presión de soplado mínima y máxima		D	R
Presión de soplado mínima de 2 Bares. Presión máxima de soplado de 8 Bares			
Dimensiones		D	R
Longitud del tornillo 1,14 metros Máquina: 1,80x1,30x150 metros			
Material a procesar		D	R
El material a usar es polietileno de alta densidad HDPE para soplado			
Velocidad del motor /tornillo		D	R
La velocidad máxima de trabajo es de 105 rpm que se controlará con un variador de velocidad.			
Velocidad del parison		D	R
Velocidad de salida del parison es de 1.34 cm/seg			
Temperatura de trabajo		D	R
El rango de temperatura que se trabajará es de 150 a 199° C			
Tiempos de soplado y calentamiento		D	R
Tiempo de soplado de 2 segundos por unidad. Tiempo de calentamiento 60 minutos			
Automatización		C	R
Mando manual para calibraciones de los dispositivos. Mando automático en todo el proceso de fabricación, excluyendo la alimentación de materia prima y el			
Fuente de operación		C	R
Energía eléctrica			
Mantenimiento		C	R
Montaje y desmontaje accesible para el mantenimiento			

Propone: C= Cliente, R/D: R= Requerimiento; D= Deseo

Adicionalmente se considera las dimensiones típicas para extrusoras de plástico recomendado por Lafleur Pierre et al [5] y Stevens, M. J., & Covas, J. (1995). [6] detallado en la tabla 2.

Tabla 2 Dimensiones típicas de una extrusora de plástico convencional [5]

DESCRIPCIÓN	MÍNIMO	MÁXIMO	VALOR TÍPICO
Longitud total ( $L$ )	20 D	30 D	24 D
Diámetro del tornillo ( $D$ )	2 cm	90 cm	
Paso del tornillo ( $p$ )			1 D
Longitud de la zona de alimentación ( $L_a$ )	4 D	8 D	4 D
Longitud de la zona de transición ( $L_T$ )	6 D	10 D	10 D
Longitud de la zona de dosificación ( $L_D$ )	6 D	10 D	10 D
Ancho del filete del tornillo ( $t$ )	0.1 D	0.15 D	0.1 D
Angulo del filete con la vertical ( $\varphi$ )	15°	30°	
Profundidad zona de alimentación ( $h_1$ )	0.1 D	0.2 D	
Profundidad zona de dosificación ( $h_2$ )	0.05 D	0.1 D	
Relación de compresión ( $h_1/h_2$ )	2	4	
Holgura entre el cañón y el filete ( $\delta$ )	0.0025 D	0.0035 D	
Revoluciones del tornillo RPM ( $N$ )	50	150	
Flujo máxico de producción ( $m_D$ )	10 Kg/h	1000 Kg/h	

Según Lafleur Pierre et al [5] se determina los parámetros que influyen en el diseño de la extrusora, se indican de acuerdo con la nomenclatura mostrada en la figura 2 y figura 3:

Tabla 3 Parámetros del diseño Geométrico del tornillo

> Temperatura ambiente $T_{amb}$	15 °C
> Material para extruir	Polietileno de alta densidad (HDPE)
> Viscosidad cinemática del HDPE fundido ( $\eta$ )	800 N s/m <sup>2</sup>
> Longitud total del tornillo ( $L$ )	0.732 m
> Diámetro del cañón ( $D_C$ )	0.0307 m
> Diámetro del tornillo ( $D$ )	0.0305 m
> Paso del tornillo ( $p$ )	0.0305 m
> Longitud de la zona de alimentación ( $L_A$ )	0.1220 m
> Longitud de la zona de transición ( $L_T$ )	0.3050 m
> Longitud de la zona de dosificación ( $L_D$ )	0.3050 m
> Ancho del filete del tornillo ( $t$ )	0.0040 m
> Profundidad zona de alimentación ( $h_1$ )	0.0060 m
> Profundidad zona de dosificación ( $h_2$ )	0.00175 m
> Holgura entre el cañón y el filete ( $\delta$ )	0.0001 m
> Velocidad de giro del tornillo ( $N$ )	105 rpm (1.75 rps)
> Factor de seguridad recomendado	2,0

En la figura 2, se observa la nomenclatura utilizada y el proceso que se aplica al polietileno de alta densidad (HDPE) dentro de la extrusora que consta de tres etapas llamadas: Alimentación, Transición y Dosificado [2] [3].

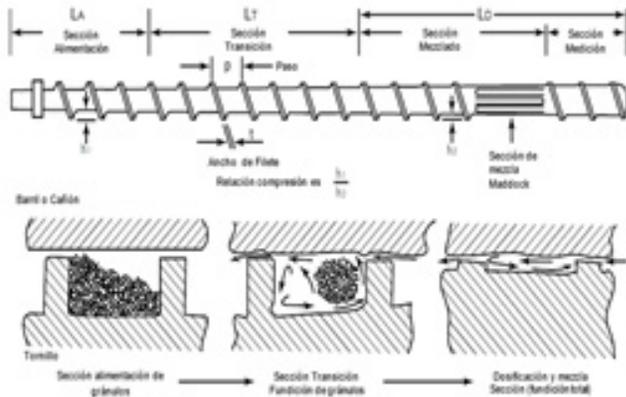


Figura 2. Diferentes zonas de una extrusora [8]

Los parámetros geométricos de diseño del tornillo son la longitud (L), el diámetro (D), el ángulo del filete ( $\phi$ ) y paso de rosca (p) [6].

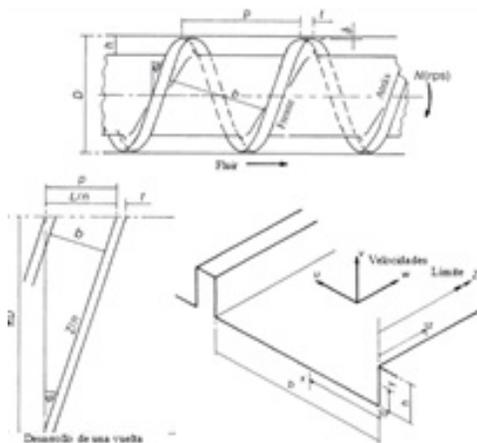


Figura 3. Nomenclatura y sistema de coordenadas

dentro de la extrusora consta de tres etapas llamadas: Alimentación, Transición y Dosificado [2] [3].

Considerando las cargas por torsión se determina el comportamiento del tornillo extrusor (material AISI 4140 normalizado) realizando el análisis estático mediante el programa ANSYS, obteniéndose la tensión de Von Mises y un factor de seguridad de 2,61 que se observan en la figura 4 y 5 respectivamente.

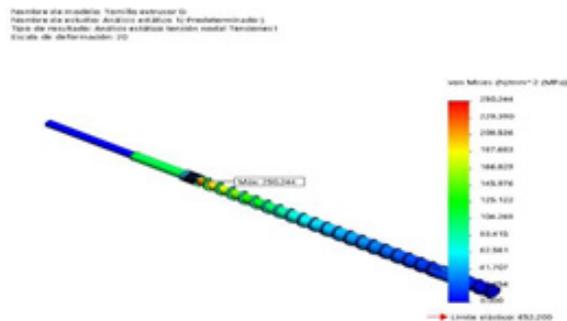


Figura 4. Tensión de Von Mises en el tornillo extrusor

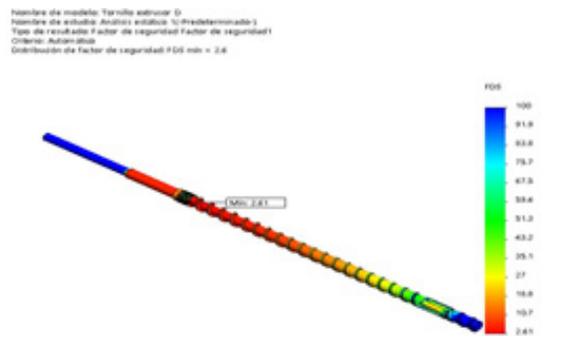


Figura 5. Factor de seguridad del tornillo extrusor

### Análisis térmico del tornillo extrusor

Para determinar el comportamiento del tornillo a las condiciones térmicas que requiere el proceso de transformación del polietileno de alta densidad se realizó el estudio en el software ANSYS, considerando como condición de frontera las temperaturas en las tres zonas del tornillo, procediendo a la simulación del estado térmico, dando como resultado una deformación de 0,157 mm y un factor de seguridad de 1,3 como se observa en la figura 6 y 7 respectivamente

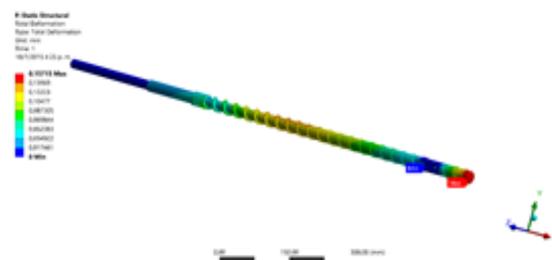


Figura 6. Deformación total del tornillo por temperatura y carga

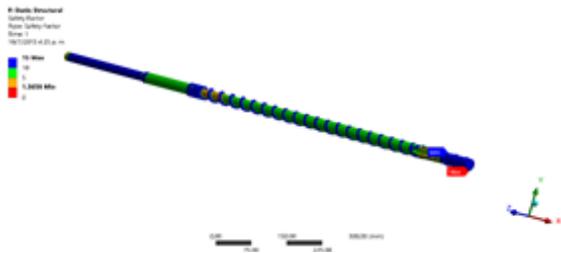


Figura 7. Factor de seguridad del tornillo por cargas y temperatura

**Análisis estático del eje del cabezal**

Las soluciones obtenidas, al realizar el análisis estático en el eje del cabezal (material AISI 4140 normalizado) considerando la carga de trabajo por efecto de la presión de obstrucción de 123,3 MPa, de la tensión de Von Mises y el factor de seguridad se observa en la figura 8 y figura 9 respectivamente

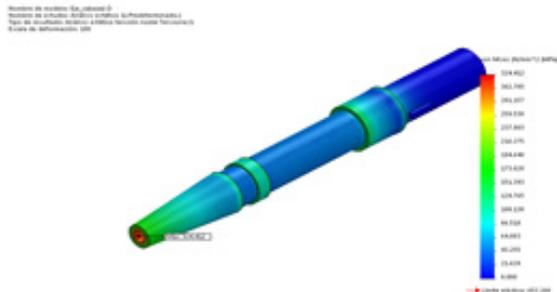


Figura 8. Tensión de Von Mises del eje del cabezal



Figura 9. Factor de seguridad del eje del cabezal

**Análisis térmico del eje de cabezal**

Considerando la temperatura que se genera en las resistencias eléctricas (tipo suncho blindadas con cintas de Níquel Cromo 80/20 y aisladas con mica ) ( $T_{rest}=281,8^{\circ}C$ ) que forman parte del sistema de extrusión, se realiza el análisis térmico en el eje del cabezal obteniéndose la deformación por la temperatura y la tensión de Von Mises, como se

observa en la figura 10 y 11 respectivamente

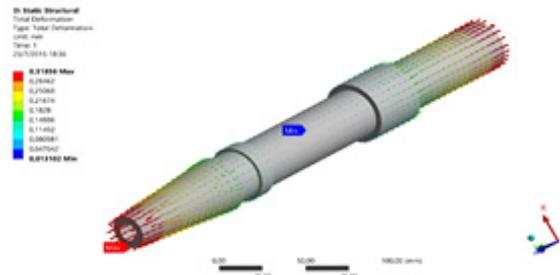


Figura 10 Deformación del eje del cabezal por la temperatura

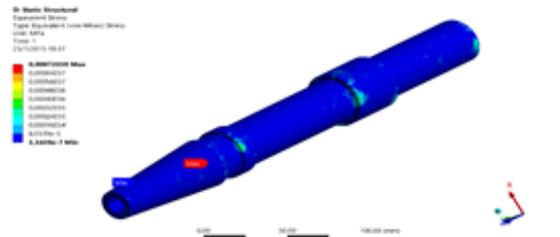


Figura 11 Tensión de Von Mises del eje del cabezal con temperatura

**Análisis estático del soporte de la extrusora**

Considerando la carga que se genera en el soporte (material fundición gris) de 2394 N, se realiza el análisis estático obteniéndose la tensión de Von Mises, y el factor de seguridad de 2,44 como se observa en la figura 12 y 13 respectivamente

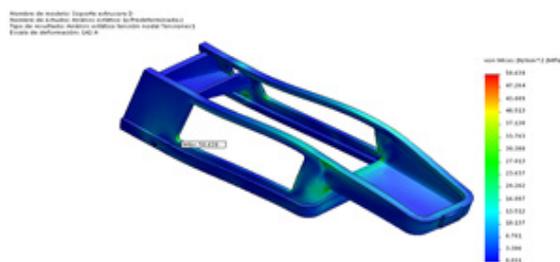


Figura 12. Tensión de Von Mises del soporte de la extrusora

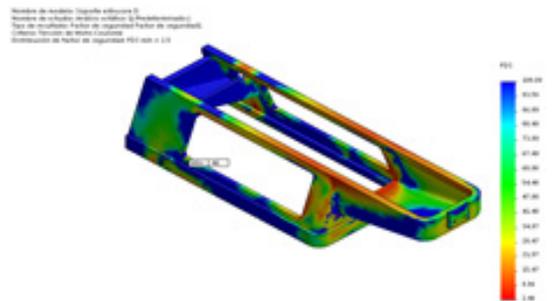


Figura 13. Factor de seguridad del soporte de la extrusora

**ENERGÍA Y MECÁNICA INNOVACIÓN Y FUTURO**  
No. 4 Vol. 1 / 2015 (13) ISSN 1390 - 7395 (1/13)

**Análisis vibracional del soporte de la extrusora**

Con el software ANSYS se realizó el estudio modal que permite ver las diferentes formas de deformación a una frecuencia máxima de 500 Hz como se observa en la figura 14.

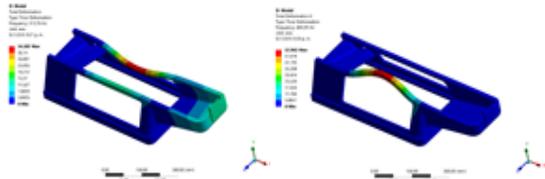


Figura 14 : Deformaciones en el análisis modal

El resultado obtenido por ANSYS a la respuesta transitoria a una frecuencia de 500 Hz y la carga sometida de 2394 N da como resultado una tensión de Von Mises y deformación presentadas en la figura 15 y figura 16 respectivamente.

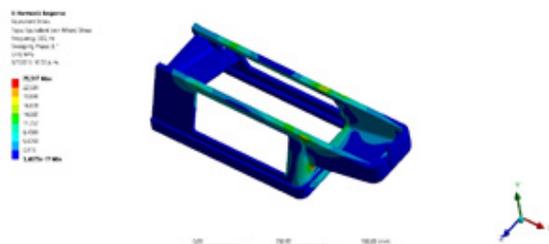


Figura 15 Tensión de Von Mises de la base a una frecuencia de 500 Hz

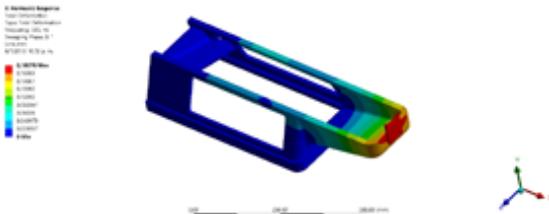


Figura 16. Deformación de la base a una frecuencia de 500 Hz

El resultado obtenido por la simulación en el análisis transitorio del ANSYS da como resultado un factor de seguridad de:

$$n = \frac{S_{ut}}{\sigma_1} = \frac{213MPa}{25,31MPa} = 8,41 \quad \text{Ec. 1}$$

Verificándose que el soporte de fundición gris de la base resistirá las cargas a dicha frecuencia

**Control electrónico del prototipo**

Para efecto del control eléctrico y electrónico se utilizó una placa electrónica con optotriacs que aísla el control con el circuito de potencia, que permitirá a más de la protección del PLC una mayor velocidad en el control de los distintos dispositivos de la máquina.



Figura 17. Placa electrónica con optotriacs

**Funcionamiento Lógico del proceso**

En la figura 18 se detalla la representación del funcionamiento lógico del proceso de la máquina sopladora de plástico incorporando el mando manual y automático.

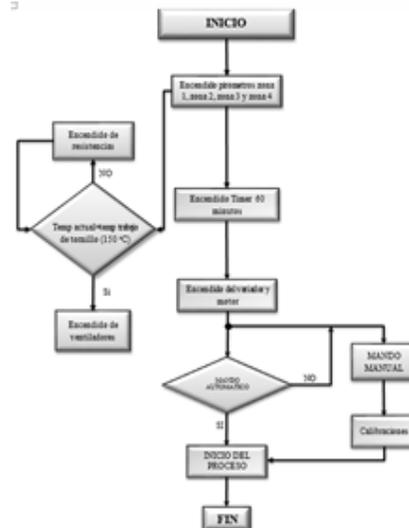


Figura 18. Diagrama de flujo del proceso de moldeo

El prototipo dispone de los elementos de potencia y el tablero que permite controlar la velocidad del tornillo, temperatura y los dispositivos neumáticos del proceso de moldeo como se observa en las figuras 19 y 20 y que servirán como equipo

**ENERGÍA Y MECÁNICA INNOVACIÓN Y FUTURO**  
No. 4 Vol. 1 / 2015 (13) ISSN 1390 - 7395 (1/13)

didáctico para generar piezas de HDPE, obtenidas por soplado

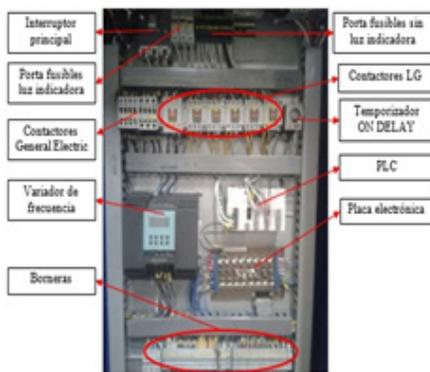


Figura 19. Armario eléctrico

Con un programa CAD se realizó el modelado geométrico de cada elemento mecánico que conforma la máquina sopladora de plástico, como se representa en el ensamblaje final de la figura

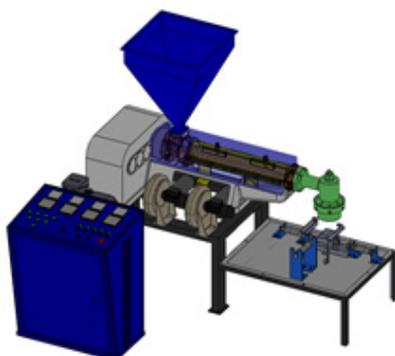


Figura 20. Modelado de la máquina sopladora de plástico

#### 4. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

Las temperaturas mínimas en cada zona del tornillo de extrusión y tener un resultado excelente para el moldeo y soplado con una velocidad mínima constante (24.6 RPM) con una frecuencia de 30 Hz se detalla en la tabla 4

Tabla 4 Apariencia del párison según la temperatura

Velocidad	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Apariencia_párison
30 Hz	150 °C	150 °C	150 °C	150 °C	poco blando
30 Hz	150 °C	170 °C	170 °C	170 °C	Muy Blando
30 Hz	160 °C	185 °C	185 °C	185 °C	Excelente
30 Hz	160 °C	175 °C	175 °C	180 °C	Acoso

La presión de soplado adecuado (2 bares) y como resultado un envase bien formado con una velocidad mínima constante y las temperaturas de cada zona ya establecidas anteriormente se detalla en la tabla 5.

Tabla 5 Presión de Soplado

Presión de soplado	Observaciones
0.5 Bares	Producto no terminado, expansión del párison mínima
1 Bar	70% producto no terminado
1.5 Bares	35% producto no terminado
2 Bares	Producto terminado, en buenas condiciones
3 Bares	Producto terminado, adhesión en las paredes del molde

Para disponer de los tiempos de soplado adecuados y como resultado un envase bien formado con una velocidad mínima, tiempo de soplado constante y las temperaturas de cada zona pre establecidas. Se varia la presión de soplado ajustando el regulador de presión, en la tabla 6 se observan los resultados.

Tabla 6 Tiempo de Soplado

Tiempo de soplado (seg)	Observaciones
0.5	Formación incompleta de la uva
1	Formación casi completa de la uva
1.2	Formación completa, con menor enfriamiento
2	Formación completa y enfriamiento óptimo
2.5	Formación completa, se empieza a pegar al molde
3	Formación completa, se pega al molde y existe acumulación del plástico en la parte superior del molde
4	Formación completa, mayor acumulación de plástico en la parte superior del molde

Para establecer la velocidad máxima del tornillo extrusor, que trabaja en el sistema de moldeo-corte y soplado utilizando los datos recomendados anteriormente. Se gira el potenciómetro variando la frecuencia del variador a diferentes valores, obteniéndose los resultados detallados en la tabla 7.

Tabla 7 Velocidad máxima del tornillo

Velocidad Rpm	Frecuencia (Hz)	Corriente a entrada $I_e$ (A)	Potencia a entrada $P_e$ (KW)	Potencia aparente $S_e$ (KVA)	Factor potencia $F_p$	Corriente motor $I_m$ (A)	Velocidad $V$ (m/s)	Velocidad $V$ (m/s)	Temperatura $T$ (°C)	Observaciones
24.6	20	4.86	0.5	1.1	0.5	8.10	110	0.26	32	Se obtiene un envase por minuto
32.8	40	7.0	0.8	1.5	0.51	8.20	146	0.48	39	Se obtiene un envase en 54 segundos con mínimo desperdicio de material
41	50	8.0	1	1.8	0.53	8.28	183	0.57	33	Se obtiene un envase en 50 segundos con mayor desperdicio de material
49.2	60	9.7	1.2	2.1	0.54	8.20	220	0.63	30	Se obtiene un envase en 47 segundos con excesivo desperdicio de material

## 5. CONCLUSIONES

- El proceso de diseño del prototipo para la máquina sopladora de plástico, considero los requerimientos iniciales del usuario, como base para determinar las características del sistema y analizar el comportamiento de los componentes mecánicos, eléctricos y neumáticos que conforman la sopladora. Lo que permitió llegar a la selección de la máquina de moldeo por soplado de extrusión continua, con una presión de soplado optima de 2 bar, con un tiempo de soplado de dos segundos.
- Para obtener la velocidad adecuada en la producción de envases de polietileno se acopló al tornillo extrusor un motor de 1750 RPM, un reductor de velocidades conjuntamente con un sistema de bandas y poleas, un variador de frecuencia para alcanzar una velocidad de 105 RPM.
- En las pruebas realizadas a diferentes valores de temperatura, presión, tiempo de soplado y frecuencia, se obtuvo como resultado que a mayor temperatura la manga de plástico (párison) se vuelve muy blanda, a una presión de soplado inferior de 1 Bar y un tiempo inferior a 2 segundos el envase utilizado como muestra (racimo de uva) no obtendrá la forma deseada y finalmente al aumentar la frecuencia del variador mayor a 40Hz se obtendrá el producto con mayor desperdicio del material

## REFERENCIAS

- [1]Askeland, D. R., Fulay, P. P., & Wright, W. J. (2010). The Science and Engineering of Materials. Australia: Sexta Edición.
- [2]Holman, J. (1986). Transferencia de Calor. México, D. F.: Continental.
- [3]Crawford, R. (1998). Plastics Engineering. London: 3ra Edición.
- [4]Riba, C. (2002). Diseño Concurrente. Barcelona: Centro de Publicaciones del Campus Nord.
- [5]Lafleur Pierre, G., & Vergnes, B. (2014). Polymer Extrusion. Great Britain and the United States.
- [6]Stevens, M. J., & Covas, J. (1995). Extruder Principles and Operation 2da Edición. Braga, Portugal: Chapman & Hall.

## BIOGRAFÍA



1 Ernesto Santillán M., nació en Riobamba. Ingeniero Mecánico de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo - Ecuador, Máster en Dirección de Empresas Mención Proyectos, Egresado en el programa de Maestría de Diseño Producción y Automatización Industrial en la Escuela Politécnica Nacional, Docente tiempo parcial en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en la ciudad de Latacunga desde el 2010. Consultor Individual en proyectos de desarrollo e inversión



2. Mario Jiménez L, nació en Salcedo. Ingeniero en Electromecánica en la Escuela Politécnica del Ejército – Ecuador. Máster en Energías Renovables en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE,

Docente tiempo completo en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga desde 1987



3 Xavier Masapanta A. Nació en Latacunga el 18 de Diciembre de 1986. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga donde obtuvo el título de Ingeniero en Electromecánica en el 2015.



4 Esteban Gavilanes V. Nació en Ambato el 18 de agosto de 1985. Realizó sus estudios secundarios en el Instituto Tecnológico Docente Guayaquil obteniendo título de Bachiller Técnico en Electrónica. Sus estudios Superiores los realizó en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga donde obtuvo el título de Ingeniero en Electromecánica en el 2015

*Registro de publicación:*

<i>Fecha de recepción</i>	<i>27 de julio 2015</i>
<i>Fecha aceptación</i>	<i>14 diciembre 2015</i>