



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## **CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

# **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA DE FILAMENTOS DE 1.75 MM Y 3 MM PARA IMPRESORAS 3D, A PARTIR DE POLÍMERO RECICLADO**

**AUTOR:  
CRISTIAN FABIÁN ORTIZ ABATA**

**DIRECTOR:  
ING. FAUSTO ACUÑA**

**Latacunga, 2018**



# AGENDA



Objetivos



Introducción



Diseño de Componentes



Selección de Componentes



Construcción e Implementación



Pruebas y Resultados



Conclusiones y Recomendaciones



# OBJETIVOS

## OBJETIVO GENERAL



Diseñar y construir una máquina extrusora de filamentos de 1.75 mm y 3mm de diámetro para impresoras 3D, a partir de polímero reciclado



# OBJETIVOS

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS



Investigar acerca de los nuevos materiales termoplásticos utilizados en impresión 3D, sus soluciones para su reciclaje y producción, así como las extrusoras que surgen en el mercado



Establecer comparaciones entre ventajas y desventajas que presentan las alternativas de extrusoras de filamento para impresoras 3D que se comercializan y desarrollan.



Reciclar objetos termoplásticos y piezas impresas en 3D para la obtención de filamentos ABS, PLA, etc.



# OBJETIVOS

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS



Diseñar el sistema de control y la transmisión del motor para las secuencias donde implique la extrusión misma del material.



Implementar un diseño que permita la obtención de filamentos de 1.75mm y 3mm de diámetro.



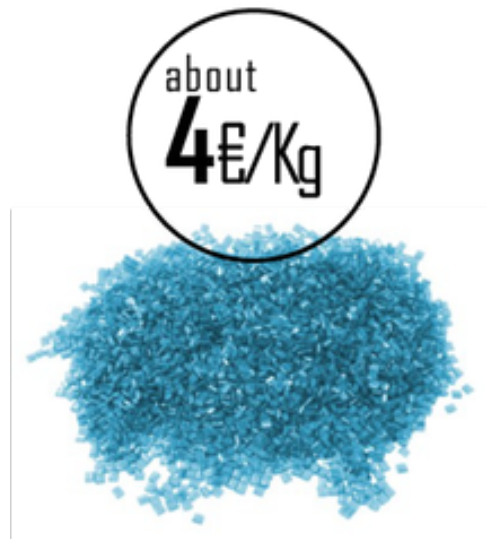
Realizar ensayos mecánicos al filamento obtenido para garantizar su utilización en impresoras 3D.



# PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La adquisición de filamento resulta costosa ya que se producen en países con mayor desarrollo tecnológico, veces este material debe ser de la misma marca que la impresora 3D.

La idea es producir filamento a partir de plástico reciclado; varias empresas procesan termoplásticos en nuestro país, este material se lo comercializa en forma de pellets, el precio del kilo oscila entre 5 a 7 dólares, en comparación a un carrete de filamento importado de un kilo que se comercializa entre 40 y 70 dólares.



# INTRODUCCIÓN

## *EXTRUSIÓN*

Con la difusión de la Impresión 3D FDM (Modelado por deposición fundida) y el compromiso de cuidar el medio ambiente a través del reciclaje de plásticos, han dado como resultado la aparición de máquinas extrusoras rápidas y compactas, capaces de trabajar con material reciclado y pellets de termoplástico, para la producción de filamentos de las dimensiones y la calidad requerida para ser utilizados en procesos tales como la Impresión 3D.



# ALTERNATIVAS EN EL MERCADO

## *Filabot Ex2*

Posee un husillo de extrusión de alto desempeño, extruye 2 libras de filamento por hora.

- Temperatura máxima: 450°C
- Controlador PID: 1
- Velocidad de extrusión: 6m/min
- Materiales de trabajo: ABS, PLA, PC, PS, HIPS
- Dimensiones: 43x18x20 cm
- Precio: \$2500



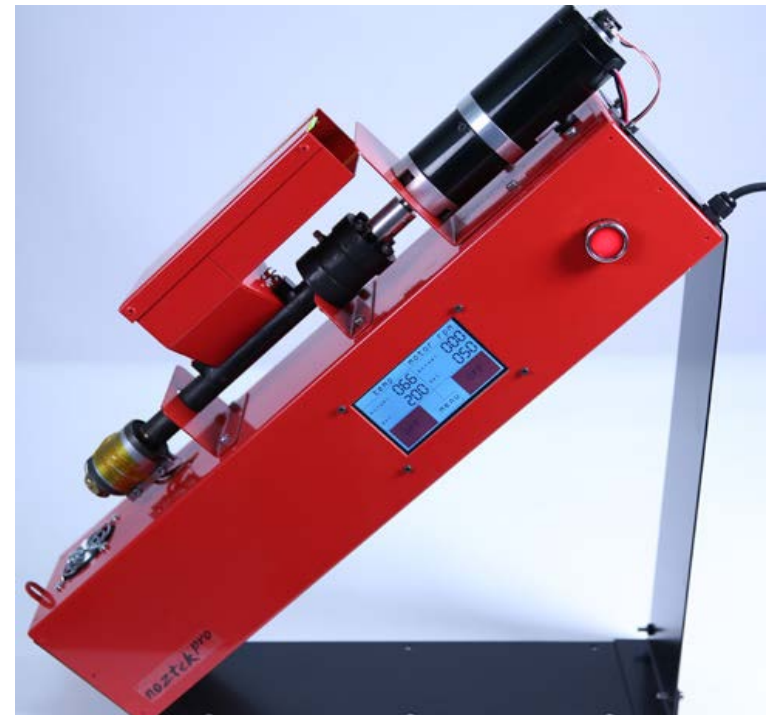


# ALTERNATIVAS EN EL MERCADO

## *Noztek Touch HT*

Extruye 1 Kg de filamento en 2 horas a 600 °C, incorpora una pantalla táctil y una interfaz intuitiva, funciona con la tarjeta controladora Arduino, opera de forma horizontal u oblicua.

- Velocidad de extrusión: 1m/min
- Tolerancia filamento extruido:  $\pm 0.04\text{mm}$
- Materiales de trabajo: ABS, PLA, entre otros.
- Dimensiones: 30x30x80 cm
- Precio: \$2400



# ALTERNATIVAS EN EL MERCADO

## *FilaFab Pro 350*

Produce 800 gramos de filamento por hora, posee un control PID digital de temperatura, un motor DC de alto torque, boquillas intercambiables, entre otras características.

- Temperatura máxima: 250°C
- Materiales de trabajo: ABS, PLA, entre otros.
- Dimensiones: 64x16x24 cm
- Potencia: 600 Watts
- Precio: \$1950



# ALTERNATIVAS EN EL MERCADO

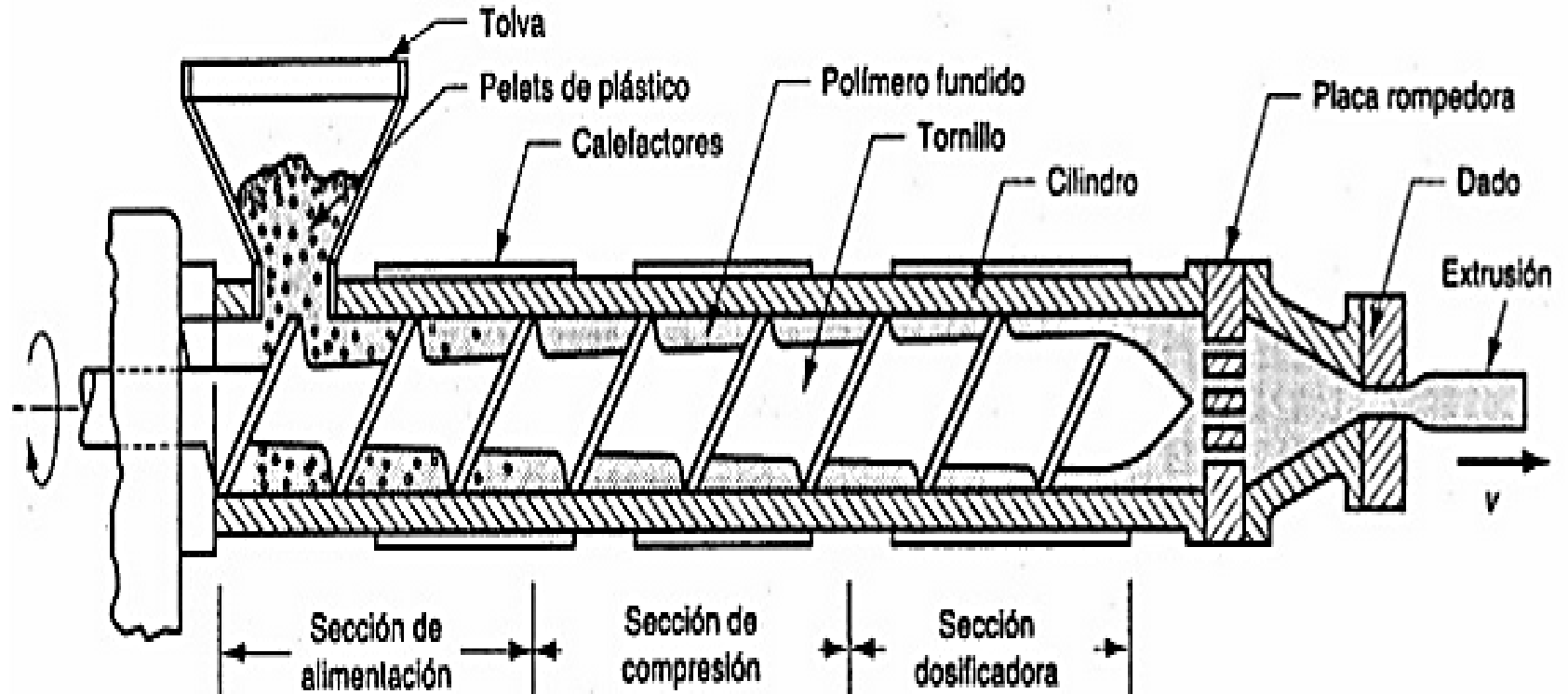
## *Características Extrusoras*

Características	FilaBot	Lyman	Noztek	FilaFab
Voltaje (Vac)	110-220	110-220	110-220	110-220
Frecuencia (Hz)	50-60	50-60	50-60	50-60
Husillo	Simple	Simple	Simple	Simple
Tarjeta controladora	Desconocido	Pic16f877a	Arduino Uno	Desconocido
Producción (gr/H)	900	-	500	800
Diámetro filamento extruido	1.75mm y 3mm	1.75mm	1.75mm y 3mm	1.75mm y 3mm
Controlador temperatura	PID	PID	PID	PID
Motor	DC	DC	DC	DC
Caja reductora	Si	Si	No	No
Ventilación	No	Si	Si	Si



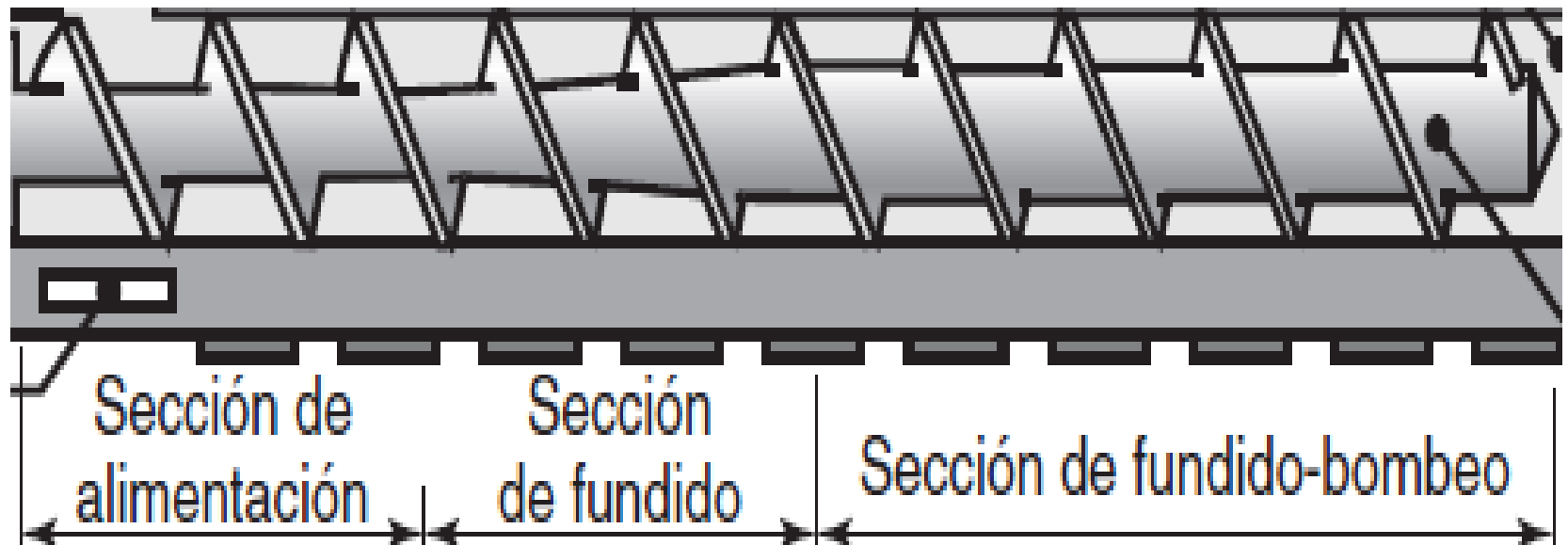
# EXTRUSIÓN

## *Partes de una extrusora*



# EXTRUSIÓN

## *Descripción del proceso de extrusión*



# EXTRUSIÓN

## *Tipos de husillos de extrusión*

Tornillo tipo nailon



Tornillo tipo polietileno



Tornillo de usos generales



Tornillo con cabeza plastificadora



# EXTRUSIÓN

## *Extrusora compacta vs. Extrusora industrial*

Características	E. Compacta	E. Industrial
Consumo eléctrico	Bajo	Alto
Espacio requerido	Poco	Mucho
Operadores	1	>1
Costo mantenimiento	Bajo	Alto
Transporte	Fácil	Difícil (Requiere desmontaje)
Calidad filamento	Medio	Medio-Alto
Manejo	Sin experiencia	Requiere capacitación y experiencia



# POLÍMEROS

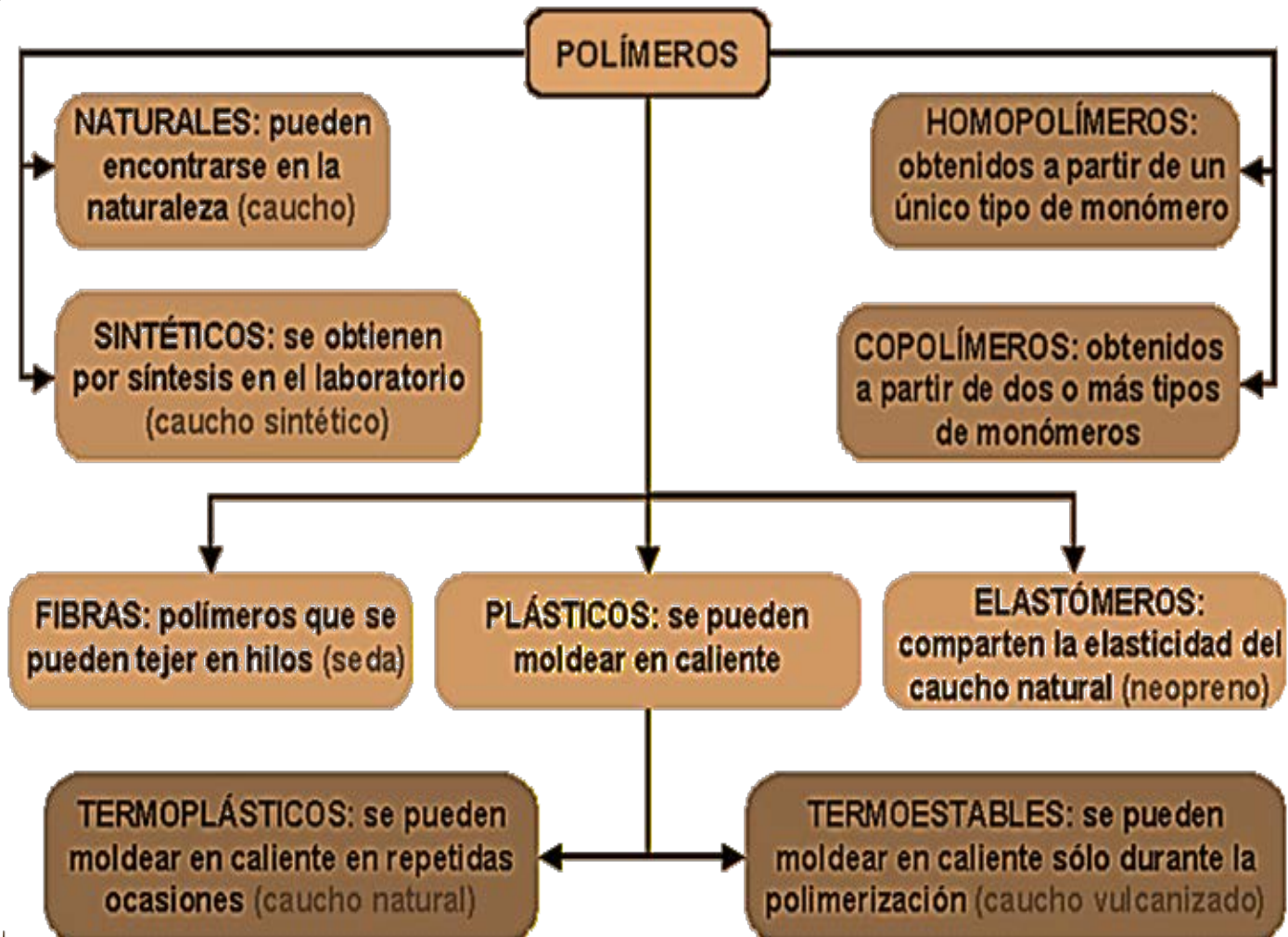
Son macromoléculas formadas por la unión de moléculas de menor tamaño (monómeros). Las unidades que componen a los polímeros derivan de moléculas de baja masa molecular relativa. El término polímero designa una combinación de un número no especificado de unidades.





# POLÍMEROS

## Tipos



# POLÍMEROS

## *COPOLÍMEROS Y TERPOLÍMEROS*

Los copolímeros están constituidos por dos tipos de polímeros, por ejemplo en la industria automovilística se utiliza el estireno-butadieno, empleado en la fabricación de neumáticos. Los terpolímeros contienen tres tipos de polímeros, como por ejemplo el ABS (acrilonitrilo-butadieno-estireno), muy utilizado en impresión 3D.



# POLÍMEROS

## ***TERMOPLÁSTICOS***

- Son duros en frío y al calentarlos se reblandecen y fluyen.
- Poseen buena resistencia al fenómeno de fluencia.
- Tienen la capacidad de derretirse antes de pasar a un estado gaseoso.
- Presentan deformación plástica al ser calentados.
- Solubilidad en ciertos solventes.
- Son procesables varias veces sin perder sus propiedades físicas y químicas

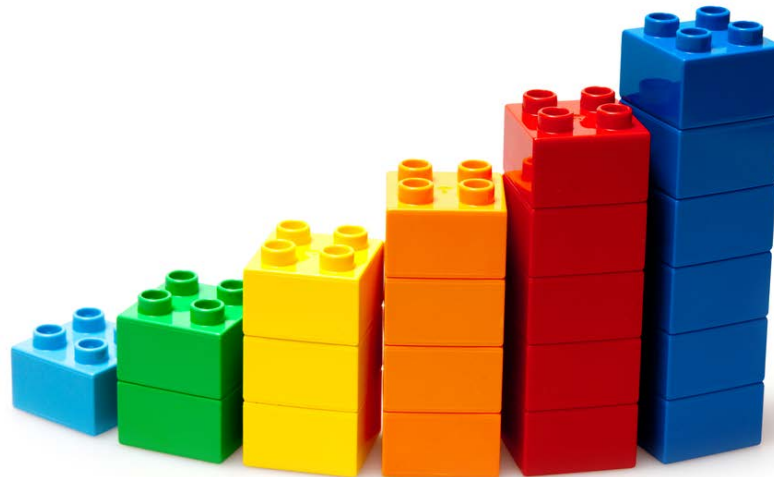


# POLÍMEROS IMPRESIÓN 3D

## ***ABS (Acronitrilo Butadieno Estireno)***

El más barato entre los termoplásticos para impresión 3D. Resistente a golpes, buena dureza y rigidez, resistente a la abrasión y elementos químicos. Soluble en acetona, le afecta la exposición a los rayos UV. Fácil de mecanizar, pulir, lijar, limar, agujerear, pintar:

- Temperatura fusión: 215-250º C.
- No biodegradable.
- Reciclable.



# POLÍMEROS IMPRESIÓN 3D

## *PLA (Ácido Poliláctico)*

Derivado de recursos naturales renovables (almidón de maíz, caña de azúcar, etc.). Biodegradable bajo ciertas condiciones. Al cumplir su vida útil, pierde las propiedades iniciales hasta su descomposición (puede tardar más de cien años) en elementos químicos simples. Utilizado para fabricar envases para alimentos, utensilios, implantes en huesos y tejidos,



# POLÍMEROS IMPRESIÓN 3D

## OTROS



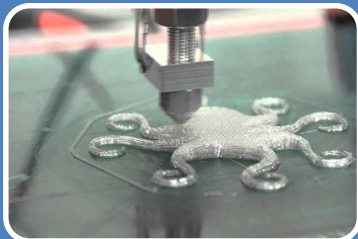
### ASA

- Acrilonitrilo estireno acrilato, similares al ABS, mayor resistencia a los rayos UV, complicaciones a la hora de imprimir con este material. produce emisiones del estireno.



### PET

- Visto en las botellas de plástico desechables. Para piezas destinadas al contacto alimentario, semirrígido y con una buena resistencia. Temperatura de impresión entre 75-90°C.



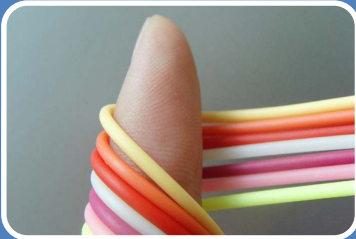
### PC

- Alta resistencia , soporta altas temperaturas, Sensible a la humedad del aire. Requiere temperaturas muy altas para la impresión



# POLÍMEROS IMPRESIÓN 3D

## OTROS



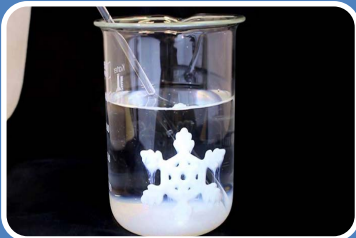
### Materiales flexibles

- TPE
- TPU
- Soft PLA



### Materiales híbridos

- PLA+Madera
- PLA+Bambú
- PLA+Corcho



### Materiales solubles

- HIPS
- PVA
- BVOH



# POLÍMEROS

## RECICLAJE



PET



PETE



HDPE



V



PVC



LDPE



PP



PS



OTHER





## *HUSILLO*

Relación  $L/D=14:1$

Profundidad del canal  $H=5$  mm

Paso  $W=28$ mm

$\theta=26,3^\circ$

Número de Filetes  $\#=13$

Flujo de arrastre  $\alpha$

Flujo de presión  $\beta$

Presión máxima  $P_{max}$

Flujo total  $Q_t$

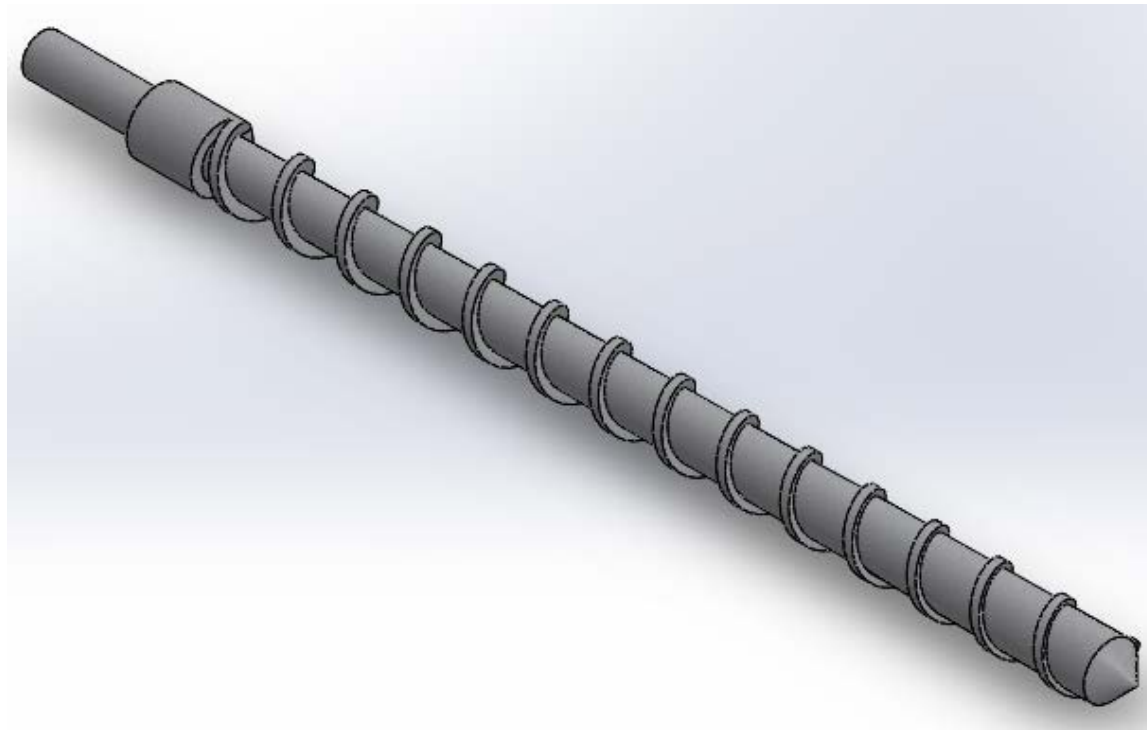
Potencia en base al flujo  $P_f$

Pérdidas  $Z_e$  &  $Z_m$

Potencia real  $P_r$

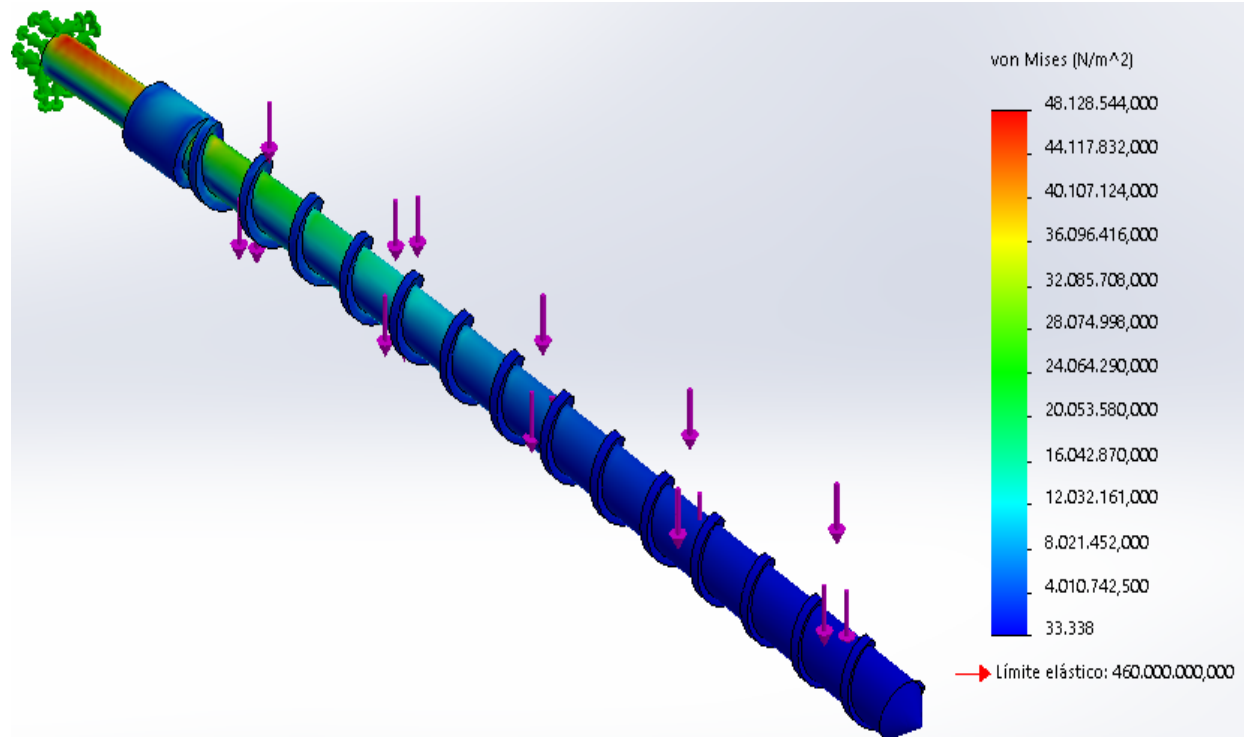
Torque  $T$

Material AISI 4140



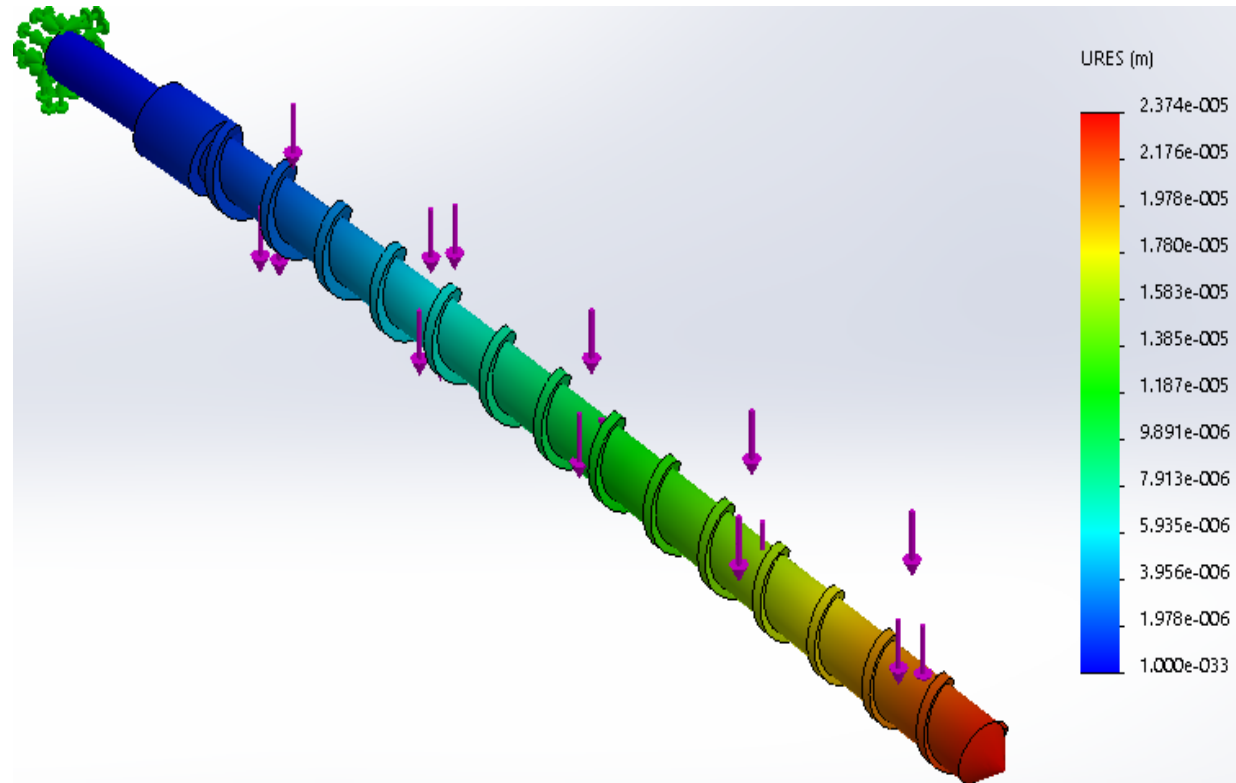
## HUSILLO

Según la figura se tiene una tensión máxima de 48,12 MPa, mientras que la tensión calculada es de 48,24 MPa,



## HUSILLO

La deformación máxima observada en la Figura es de  $2,37 \times 10^{-5} m$ , mientras que la deformación calculada es de  $2,87 * 10^{-5} m$ ,



## ***BARRIL***

Diámetros  $D_i$  &  $D_e$

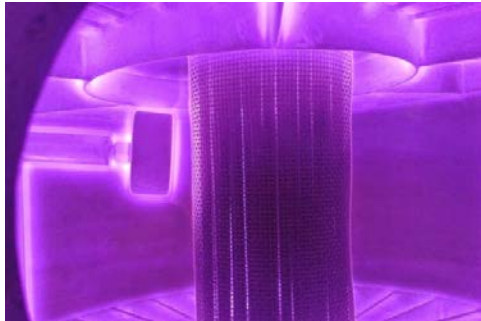
Espesor  $E_b$

Holgura Barril/Husillo

Garganta de alimentación

Material AISI 1018

Nitrurado por 40 horas



## TOLVA

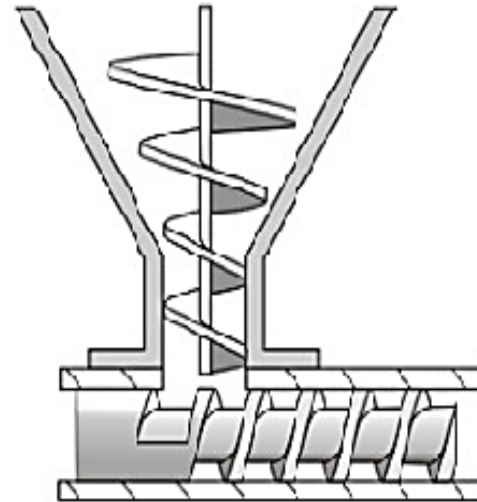
Tipos de tolva



a) Circular



b) Rectangular



c) Tornillo Crammer

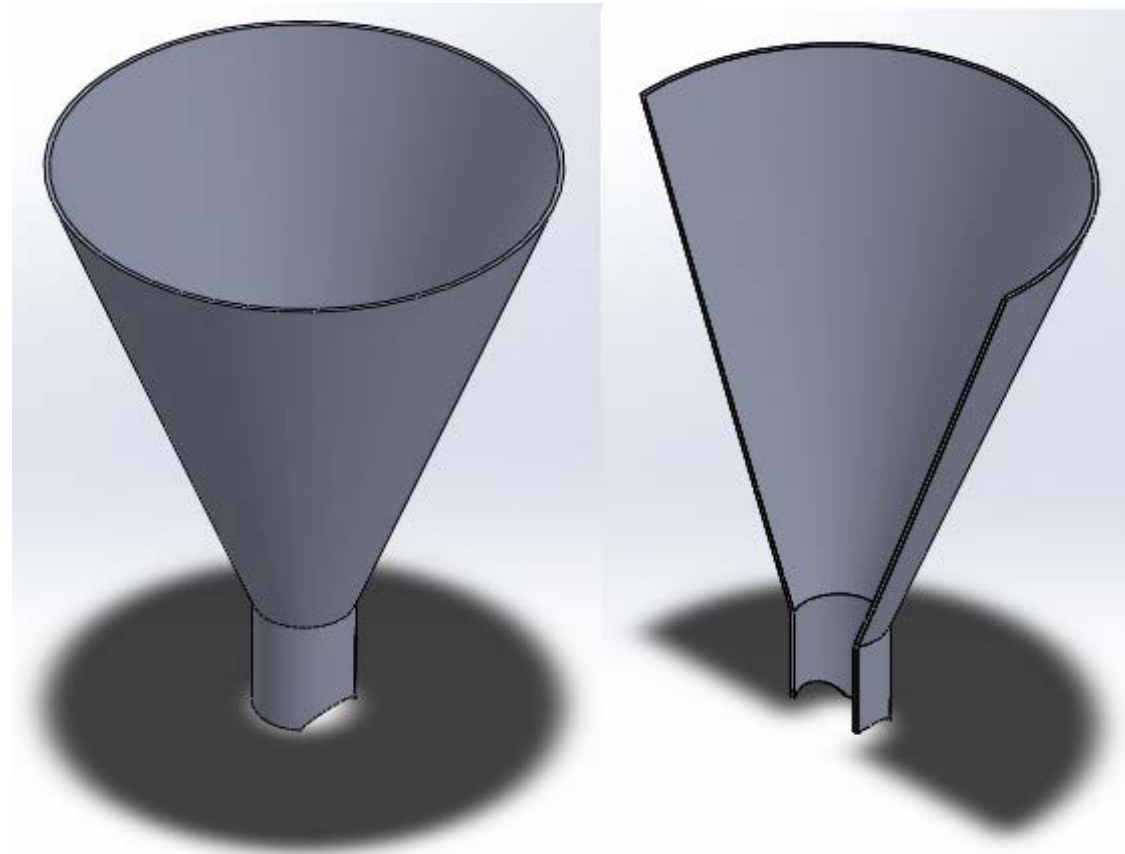
## TOLVA

Volumen  $V_t$

Volumen tronco de cono  $V_T$

Altura cono  $h_c$

Material ASTM A36



## CABEZALES

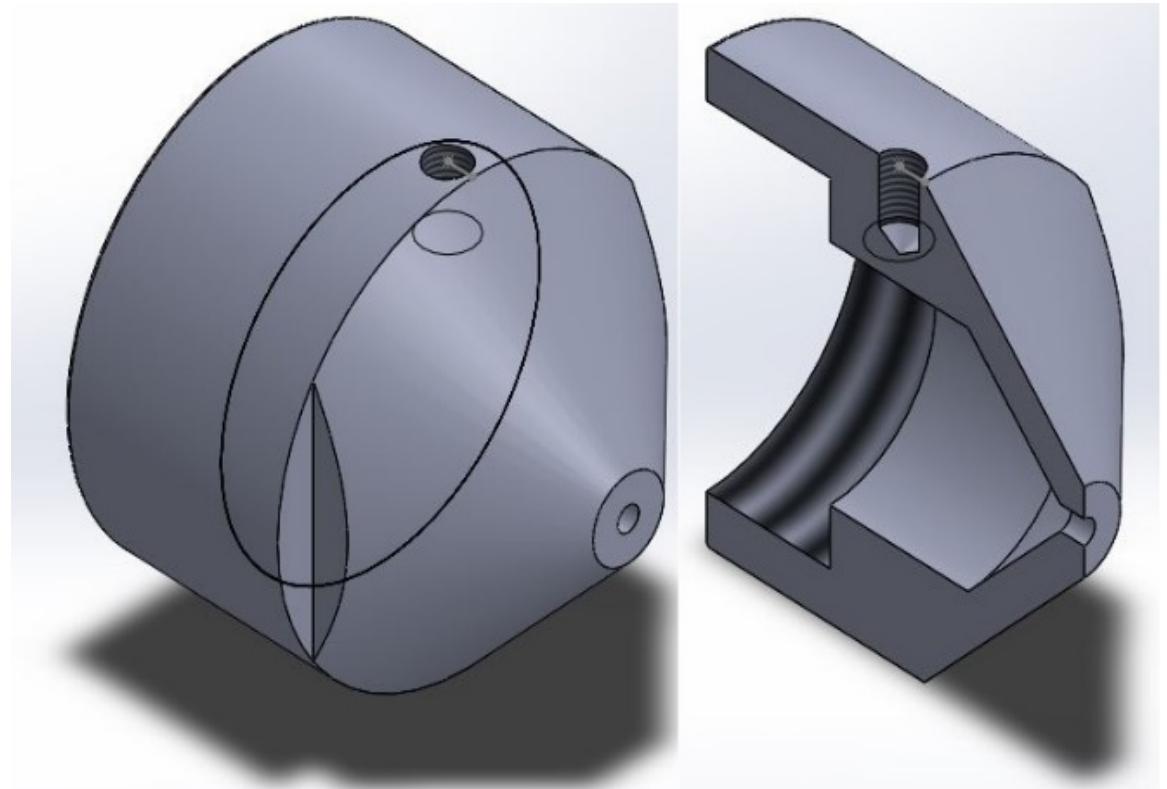
Espesor  $E_c$

Longitud  $L_c$

Longitud punta cabezal  $L_{pc}$

Diámetro punta cabezal  $D_{pc}$

Material AISI 1018



# SELECCIÓN DE COMPONENTES

## COMPONENTES ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS



### Motor AC

- Trifásico 4 polos
- ½ HP



### Controlador Temperatura

- PID
- SSR



### Termopar

- Tipo K
- -200 a 1370 °C





# SELECCIÓN DE COMPONENTES

## COMPONENTES ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS



### Resistencia calefactora

- Tipo banda
- Eficiente en superficies cilíndricas



### Ventilador

- 220 AC
- Alto flujo de aire



### Variador de frecuencia

- Siemens Sinamics V20
- ½ HP-Modbus



# CONSTRUCCIÓN

## *Elementos mecanizados*

Se han utilizado procesos de manufactura tales como: fresado, torneado, soldadura, corte plasma, doblado, etc. En los siguientes elementos:

Barril

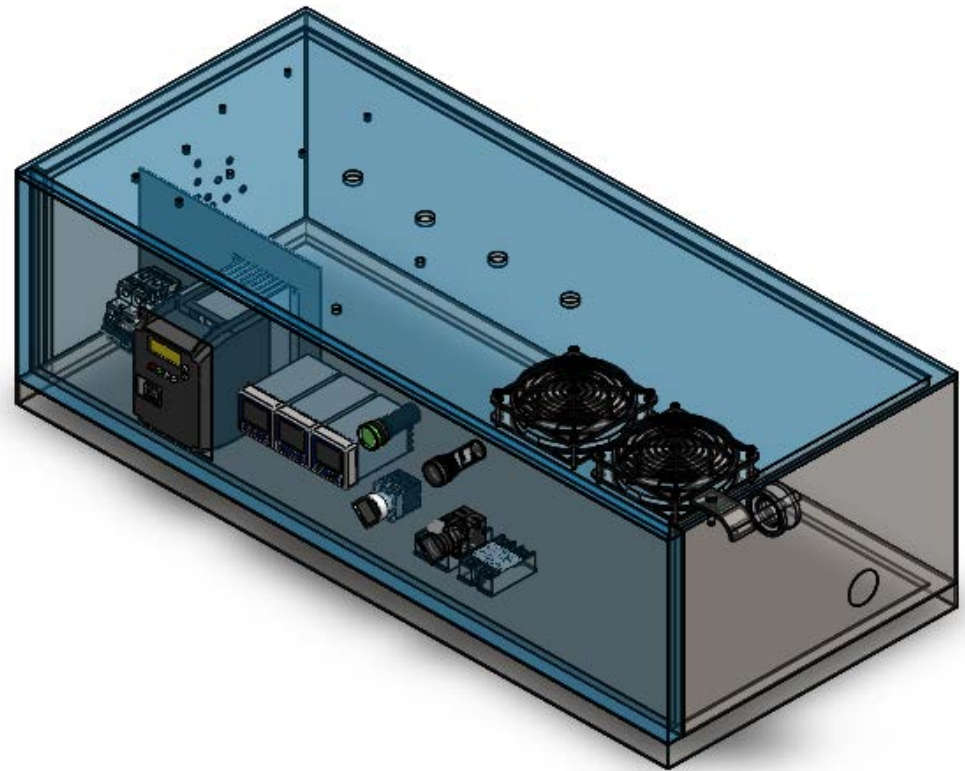
Brida

Estructura

Soportes

Cabezales

Tolva



# CONSTRUCCIÓN

## *Husillo prefabricado*

Se ha adquirido un husillo de uso general con parámetros similares a los calculados en la etapa de diseño, por razones de tiempo y costes de fabricación.



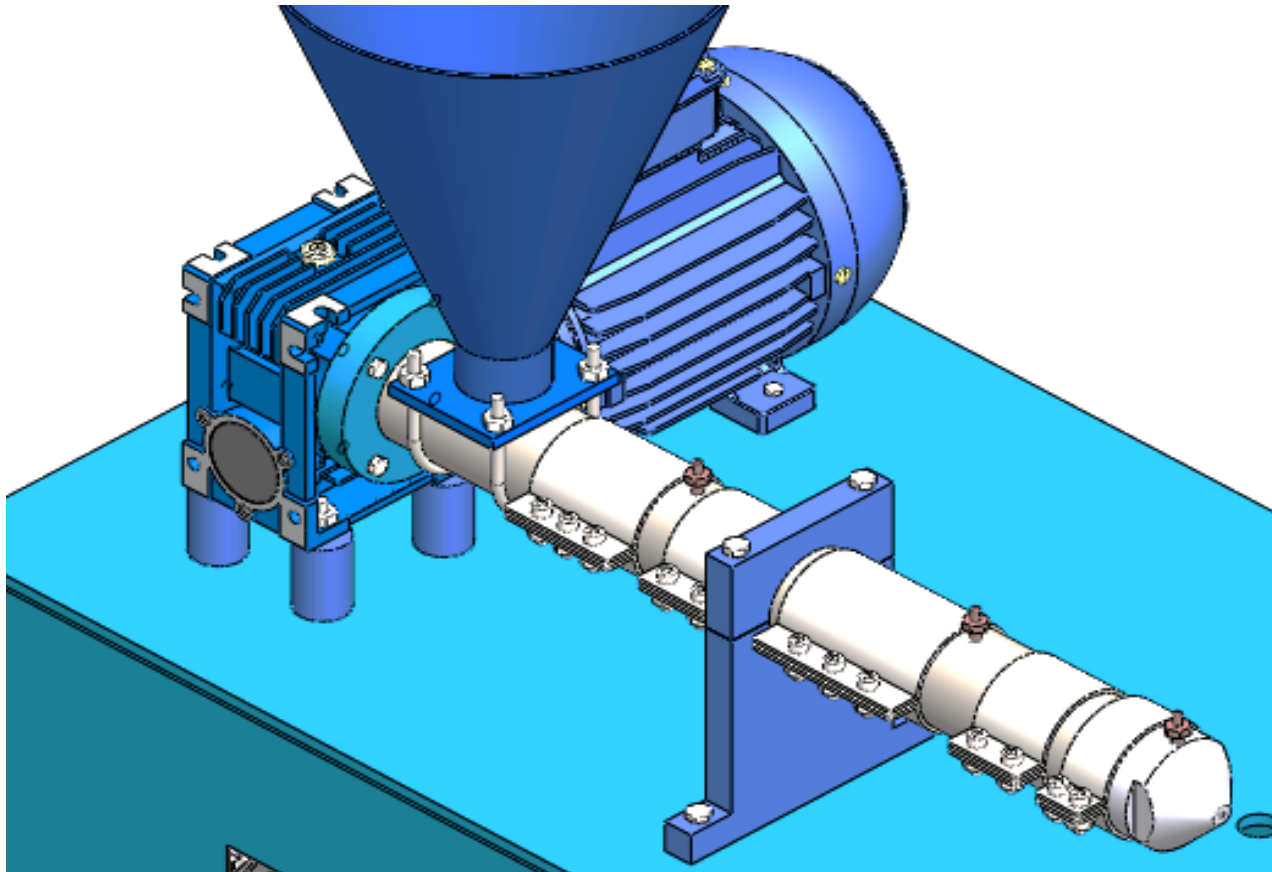
# CONSTRUCCIÓN

## *Construcción Tolva*



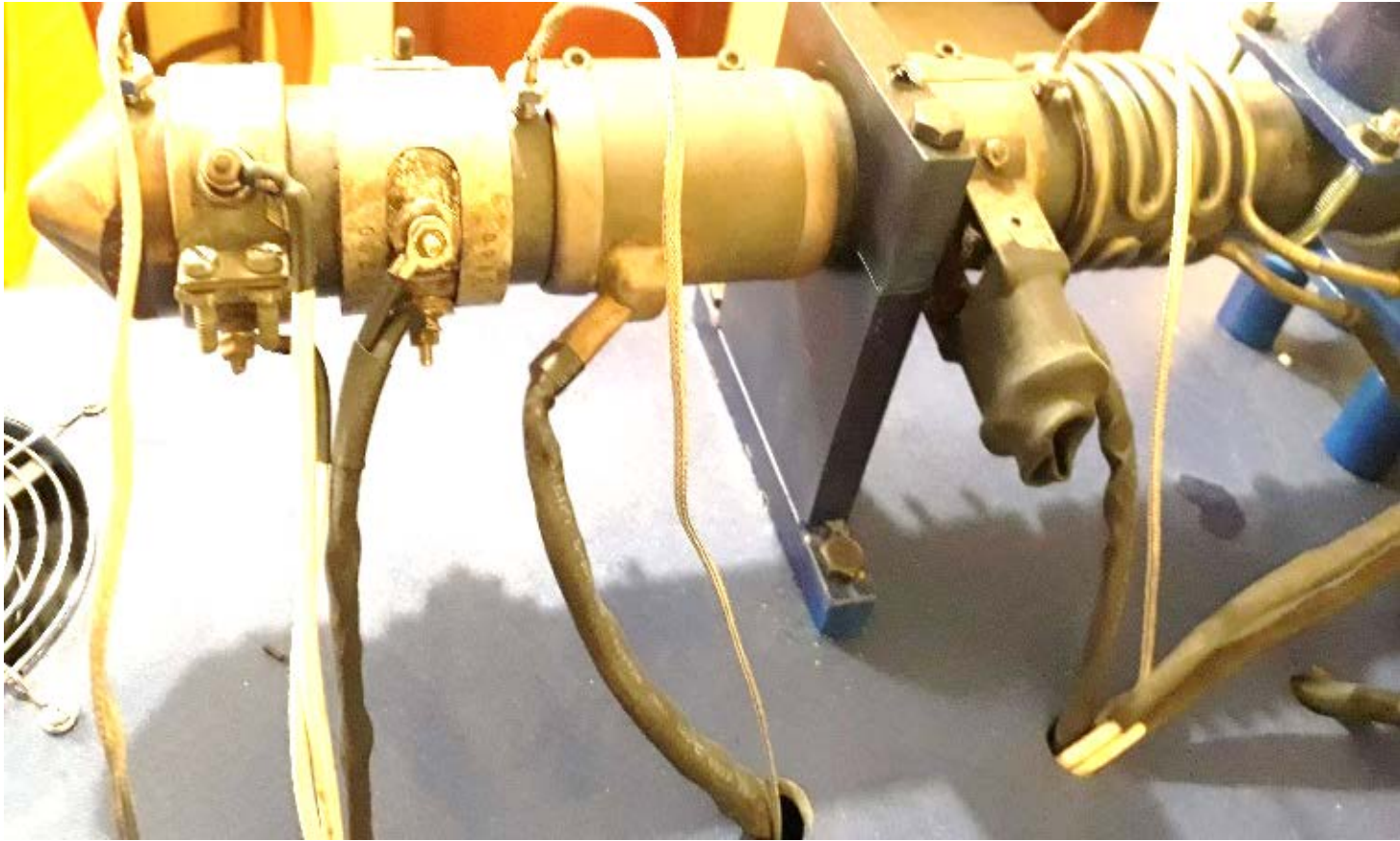
# CONSTRUCCIÓN

## *Disposición de elementos*



# CONSTRUCCIÓN

## *Disposición de elementos*



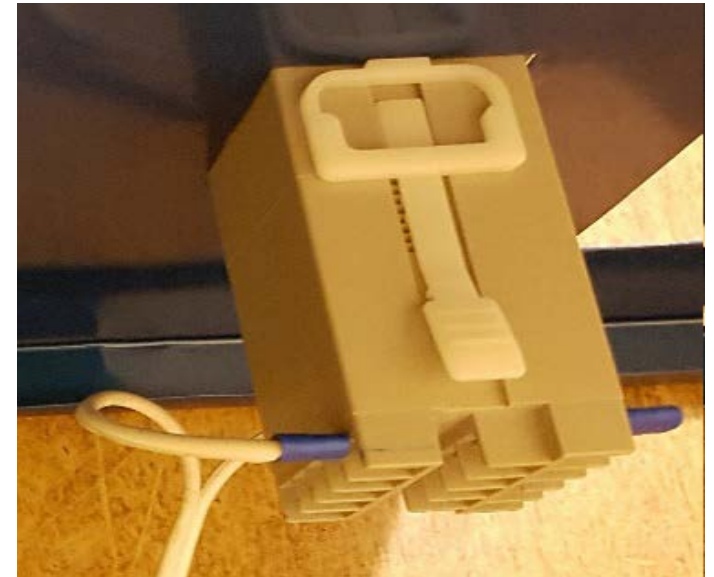
# CONSTRUCCIÓN

## *Disposición de elementos*



# CONSTRUCCIÓN

## *Montaje controladores PID*





# CONSTRUCCIÓN

## *Montaje Ventiladores*

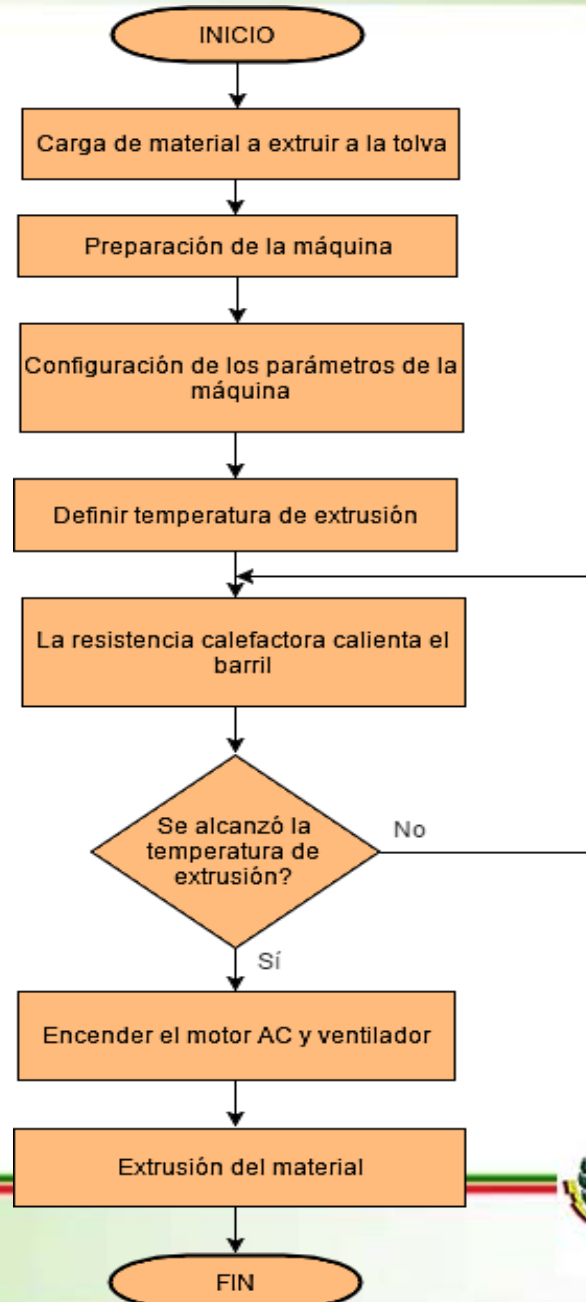


# CONSTRUCCIÓN

## *Disposición Luces Piloto y Switches*



# Diagrama de flujo proceso de extrusión



# CONSTRUCCIÓN

## *Implementación del Sistema Total*



# PRUEBAS Y RESULTADOS

## *ABS Reciclado*

Este material muchas veces viene con impurezas que pueden obstruir el cabezal.

También es mezclado con fibra de vidrio para mejorar su resistencia a altas temperaturas.



# PRUEBAS Y RESULTADOS

## *ABS Virgen a 180°C*

Se emplearon pellets de ABS marca Chimei. Al extruir a 180°C se obtuvo un filamento que se enfría relativamente rápido por lo que toma una forma no definida



# PRUEBAS Y RESULTADOS

## *ABS Virgen a 210°C*

Mientras que con la temperatura que recomienda el fabricante en la hoja de datos del plástico ABS Chimei que es 210°C se obtuvo un filamento homogéneo fácil de enrollar



# PRUEBAS Y RESULTADOS

## *ABS Virgen a 240°C*

Finalmente se realizó una prueba extruyendo material a 240°C, el resultado fue un filamento con humo en su interior en forma de burbujas y emitido a través del cabezal





# PRUEBAS Y RESULTADOS

## PLA

En el país no existe empresa dedicada a comercializar PLA en forma de pellets, su importación resulta costosa por aranceles e impuestos. Para dar solución a este inconveniente, se ha adquirido un carrete de filamento PLA de 1.75mm de diámetro, además de que se han conseguido restos de impresiones 3D en este mismo material.



# PRUEBAS Y RESULTADOS

## *Mezcla PLA y ABS*

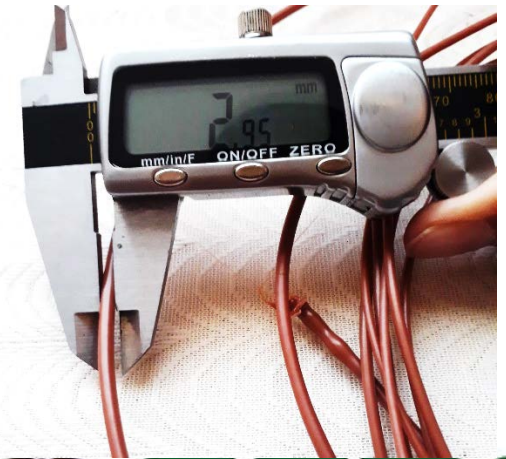
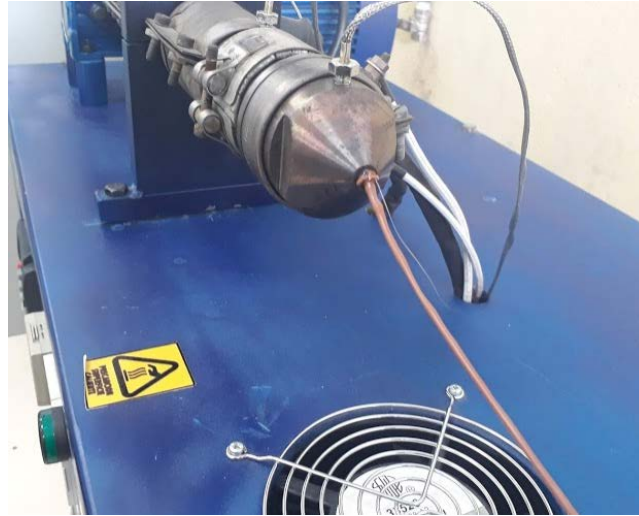
Debido a que la máquina estuvo trabajando con ABS, éste se mezcló con PLA, al principio se produjo un material con un excesivo diámetro y forma no homogénea, debido a la excesiva presión se detuvo el variador de frecuencia como forma de proteger al motor. Sin embargo se pudo poner en marcha el motor y variador continuando con el proceso



# PRUEBAS Y RESULTADOS

## *Extrusión PLA*

Una vez que todo el material ABS fue evacuado del barril, el PLA pudo ser extruido normalmente, se obtuvo un diámetro menor al del ABS utilizando los mismos parámetros de extrusión, se recomienda modificar valores de temperatura y velocidad del variador para obtener filamento con tolerancias adecuadas



# PRUEBAS Y RESULTADOS

## *Proceso de MASTERBATCH*

Masterbatch es el proceso mediante el cual se le da color a ciertos termoplásticos al ser extruidos, se utilizó pellets de poliestireno azul.

Para dar color al ABS se debe mezclar del 0,5% al 3% de su contenido en pellets de poliestireno pigmentados



# PRUEBAS Y RESULTADOS

## *Resultado de MASTERBATCH*

Se mezclaron pellets de ABS con el 1% de su volumen total en pellets de PS azul (es decir por cada 100 gr debe haber 1 gr de PS) dando como resultado un filamento de color homogéneo



# PRUEBAS Y RESULTADOS

## *Tolerancias Diámetro del filamento ABS*

El diámetro de filamento más utilizado en Impresión 3D es 1.75mm, La Tabla muestra las mediciones obtenidas del filamento ABS comparado con marcas comerciales (Sunlu, Stratasys, HIPS), se han tomado 5 mediciones con sus correspondientes tolerancias.

	<u>Sunlu</u>		<u>Stratasys</u>		HIPS		ABS Proyecto	
	<u>Dim.</u>	Tol.	<u>Dim.</u>	Tol.	<u>Dim.</u>	Tol.	<u>Dim.</u>	Tol.
Medición 1	1.77	+0.02	1.75	0	1.76	+0.01	1.8	+0.05
Medición 2	1.78	+0.03	1.75	0	1.75	0	1.95	+0.2
Medición 3	1.77	+0.02	1.75	0	1.76	+0.01	2	+0.25
Medición 4	1.77	+0.02	1.75	0	1.76	+0.01	1.8	+0.5
Medición 5	1.74	-0.01	1.75	0	1.76	+0.01	1.9	+0.15
Promedio	1.766	±0.02	1.75	0	1.758	+0.0016	1.89	+0.23



# PRUEBAS Y RESULTADOS

## *Ensayo de tracción del filamento ABS*

Se han tomado probetas de 100mm de longitud y 1.75mm de diámetro, siguiendo las indicaciones y parámetros de las normas para materiales plásticos. Se ha comparado el filamento ABS producido en este proyecto frente a marcas como Sunlu, Stratasys y HIPS.

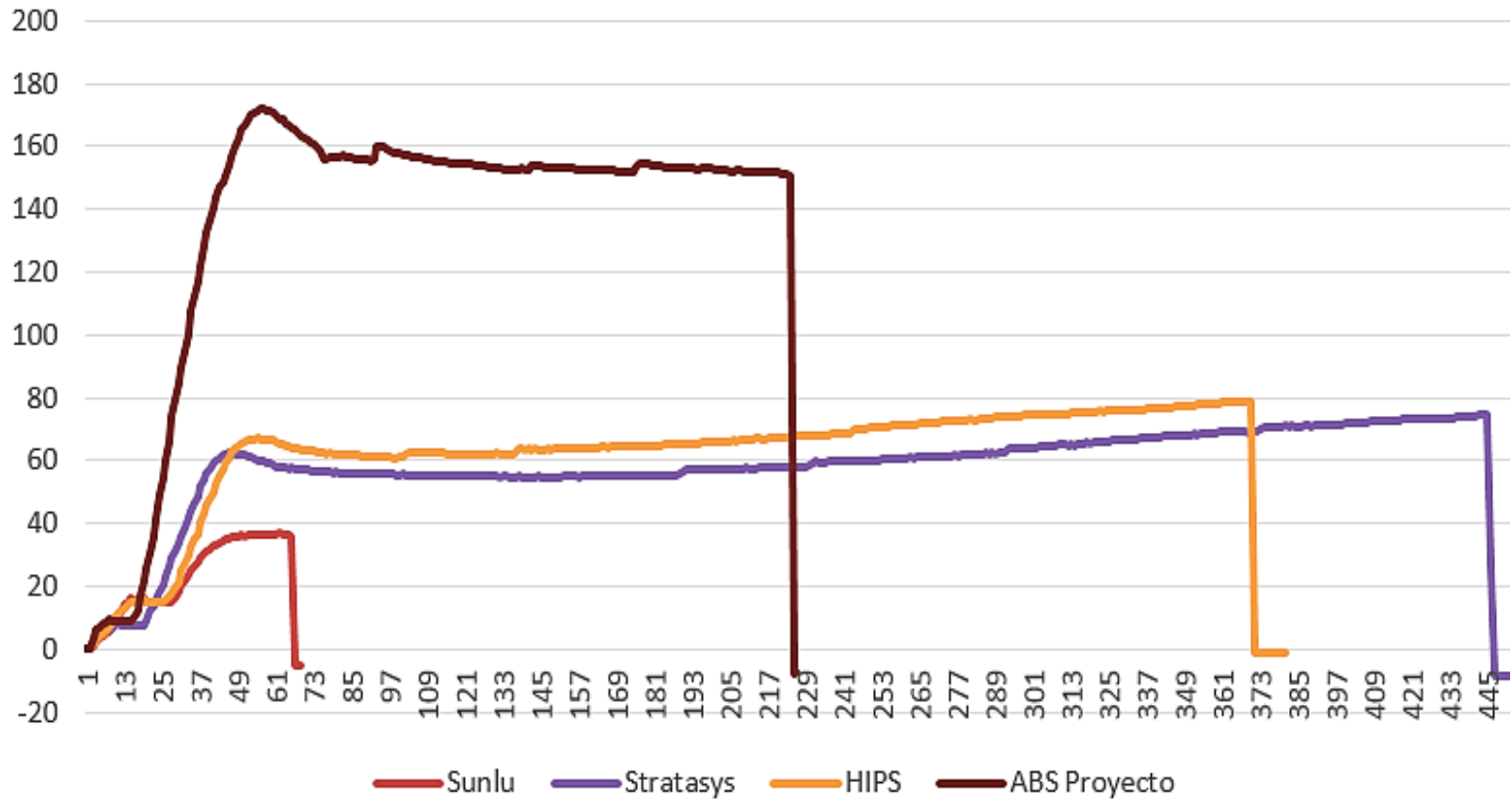
Filamento (marca)	Long. inicial	Long. Final	%Elongación
<u>Sunlu</u>	100mm	104.9mm	4.9%
<u>Stratasys</u>	100mm	184.9mm	84.9%
<b>HIPS</b>	100mm	164.8mm	64.8%
<b>ABS Proyecto</b>	100mm	139.3mm	39.3%



# PRUEBAS Y RESULTADOS

## Ensayo de tracción del filamento ABS

Ensayo 1





# VALIDACIÓN HIPÓTESIS

La hipótesis está definida como:

***“Mediante el diseño y construcción de una máquina extrusora, se producirá filamento de 1.75 mm y 3mm de diámetro para impresoras 3D a partir de polímero reciclado.”***

Para su validación se utilizará la prueba de Causalidad de Granger. Donde se requiere la variable dependiente y la variable independiente:

***V. Dependiente:*** Polímero reciclado.

***V. Independiente:*** Máquina extrusora de filamentos de 1.75 mm y 3mm de diámetro para impresoras 3D.



# VALIDACIÓN HIPÓTESIS

## *Prueba de Causalidad de Granger*

Consiste en deducir si los resultados de una variable sirven para predecir a otra variable. Se tiene que comparar y deducir si el comportamiento **ACTUAL** y **PASADO** de una variable A predice la conducta de variable B. Se compara mediante cuestionamientos la variable dependiente (variable A) con la variable independiente (variable B) y verificar si la hipótesis se cumple en su totalidad (comportamiento bidireccional) o parcialmente (comportamiento unidireccional).



# VALIDACIÓN HIPÓTESIS

## *Prueba de Causalidad de Granger*

La Tabla muestra la conducta entre la variable A hacia la variable B, considerando como variable A al **Polímero reciclado** y variable B a la **Máquina extrusora de filamentos de 1.75 mm y 3mm de diámetro para impresoras 3D**. Se ha establecido la conducta como “Afecta/Afectó el funcionamiento de” y se comparó en tiempo actual y pasado.

TIEMPO	CONDUCTA V.A vs V.B	RESULTADO	RAZÓN
ACTUAL	¿Polímero reciclado afecta el funcionamiento de Máquina extrusora?	Afirmativo	La extrusora trabaja en óptimas condiciones con ABS virgen
PASADO	¿Polímero reciclado afectó el funcionamiento de Máquina extrusora?	Afirmativo	ABS reciclado aumenta la presión dentro de la extrusora.



# VALIDACIÓN HIPÓTESIS

## *Prueba de Causalidad de Granger*

La Tabla muestra los cuestionamientos entre la variable B con la variable A, tomando las mismas consideraciones antes mencionadas, excepto la conducta que se define como “Puede/Pudo extruir” y se comparó en tiempo actual y pasado.

TIEMPO	CONDUCTA V.B VS V.A	RESULTADO	RAZÓN
ACTUAL	¿La máquina extrusora puede extruir polímero reciclado?	Negativo	No se han hecho modificaciones en la máquina que permitan extruir polímero reciclado
PASADO	¿La máquina extrusora pudo extruir polímero reciclado?	Negativo	ABS reciclado tiene alto punto de fusión.



# VALIDACIÓN HIPÓTESIS

## *Prueba de Causalidad de Granger*

Contrastando los resultados de la primera Tabla se puede observar que la conducta de la variable A hacia la variable B tanto en pasado como en la actualidad son afirmativos. Mientras que en los resultados de la segunda Tabla ambas conductas fueron negativas. Por lo tanto el comportamiento es unidireccional y la hipótesis si se cumple pero de forma parcial. Es decir, la extrusora puede procesar polímero siempre y cuando éste no sea reciclado.



# ANÁLISIS DE COSTOS

Elemento	Cantidad	P. Unitario	P. Total
Barril	1	100	100
Estructura	1	180	180
Motorreductor 40:1	1	100	100
Controlador PID	3	90	270
Variador de frecuencia	1	220	220
Motor AC	1	110	110
Plástico ABS (25 Kg)	1	125	125
Husillo	1	150	150
Tolva	1	50	50
Resistencia calefactora	5	25	125
<u>Breakers</u>	2	10	20
SSR	2	20	40
Ventiladores	2	25	50
Material Eléctrico	1	100	100
Material Mecánico	1	500	500
<b>TOTAL</b>			<b>2140</b>



# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## CONCLUSIONES



Se diseñó e implementó una Máquina Extrusora de Filamentos de 1.75 mm y 3 mm para Impresoras 3D, con velocidad de extrusión de 10cm/min capaz de trabajar con ABS virgen y ser empleado en ciertas impresoras 3D que permitan mayores tolerancias de filamento.



Al realizar la extrusión se ha obtenido un filamento de mayores tolerancias comparado con filamentos de mayor precio y calidad, para obtener tolerancias dentro del rango de filamentos comerciales y normados es necesario un sistema de control para el diámetro de filamento.



La máquina fue capaz de extruir ABS reciclado, el mismo que no garantiza la calidad necesaria para Impresión 3D debido a que contiene residuos no plásticos y en la mayoría de veces está mezclado con fibra de vidrio.



# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## CONCLUSIONES



Se pudo realizar Masterbatch al filamento de ABS extruído obteniendo tonalidades en diversos colores, con un mezclado de material uniforme sin presentar atascamientos en el cabezal, mezclando del 1 al 3% de resina pigmentada al volumen total de materia prima.



Se verificó el funcionamiento de la máquina extrusora con PLA utilizando trozos de impresiones y filamento cortado, dando como resultado un material de diámetro menor al esperado, se debe principalmente a que la temperatura fijada extrusora fue demasiado alta.





# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## RECOMENDACIONES



Al momento de la extrusión, hay que verificar que el material a ser procesado (pellets), esté libre de cualquier residuo ajeno al termoplástico, de lo contrario se corre el riesgo de que el filamento incorpore estos elementos que pueden obstruir el cabezal.



Antes de realizar la extrusión se debe esperar un lapso de 15 minutos para que el barril se caliente de manera uniforme, de lo contrario se corre el riesgo de que se tape el barril debido a la diferencia de temperaturas.



# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## RECOMENDACIONES



Al intercambiar cabezales, realizar dicha acción con el sistema a 200°C y una vez desconectado el sistema de la red eléctrica utilizando EPP.



No poner en marcha el variador de frecuencia mientras el sistema no haya alcanzado la temperatura adecuada de extrusión, de lo contrario se produciría daños serios a este dispositivo.



# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## RECOMENDACIONES



Jamás apagar o desconectar de la red eléctrica el variador de frecuencia mientras está en marcha, a menos que sea estrictamente necesario, este dispositivo es sensible y esta acción puede causar daño irreparable.



Para proyectos complementarios al desarrollo de la extrusora, se recomienda el diseño e implementación de un sistema de control para el diámetro de filamento extruido, con la finalidad de garantizar su utilización en impresoras 3D.



Gracias



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA