

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA PRENSA GRANULADORA DE MADERA AUTOMATIZADA DE HASTA 200 KG/HR PARA LA EMPRESA RECICLAJES MYS S.A.”

*Santiago Raúl Guerra Ludeña*  
*Ingeniería Mecatrónica, Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE*  
*san\_gue1990@hotmail.com*

---

## 1. RESUMEN

En el presente proyecto se describe el diseño y simulación de una prensa granuladora de madera automatizada de hasta 200 kg/hr, debido a un requerimiento de la empresa RECICLAJES MYS S.A. de reutilizar el aserrín que se produce después de la etapa de corte en el conformado de tableros, encofrados con madera reciclada. La importancia de este trabajo radica en la reutilización de desechos de la industria, para crear un nuevo producto mediante esta máquina es gránulos de madera o pellets, que sirven como combustible orgánico alternativo. Para el diseño, se parte de la capacidad de producción que la empresa tiene de generar la materia prima que utiliza la máquina, y las características que debe tener el granulo de madera, todo esto con el fin de establecer las dimensiones y componentes de la máquina. Se definen los sistemas que se van a utilizar, y se diseña los elementos mecánicos de la prensa y se obtienen planos y simulaciones mediante la herramienta del software, en este caso Autodesk Inventor. Una vez concluido el diseño mecánico de la prensa, se desarrolló la automatización de la misma, con los requerimientos de la empresa.

## 2. ABSTRACT

This draft describes the design and simulation of an automated wood pelleting press up to 200 kg/hr, due to a requirement of the company RECICLAJES MYS SA reuse the sawdust which occurs after the cutting step in the forming board, recycled wood formwork. The importance of this work lies in the reuse of industrial waste, to create a new product by this machine wood pellets or pellets, which serve as alternative organic fuel. For design, it is part of the production capacity that the company has to generate the raw material used by the machine, and the features that should have the wood pellet, all with the aim of establishing the dimensions and components of the machine. Systems are defined to be used, and the mechanical design of the press and plans and simulations are obtained using the software tool, in this case Autodesk Inventor. Once the mechanical design of the press was finished, the automation developed it, with the requirements of the company.

### 3. INTRODUCCION

#### 3.1 ANTECEDENTES

RECICLAJES MYS S.A. es una empresa ecuatoriana especializada en la administración, manejo, gestión, valorización y reciclaje de residuos y disposición de desechos no reciclables, peligrosos y no peligrosos, generados por las distintas actividades industriales, comerciales, de servicios e institucionales; con alcance nacional.



**Figura 1** Logo de la empresa Reciclajes MYS

Fuente: [www.reciclajesmys.com](http://www.reciclajesmys.com)

#### 3.2 JUSTIFICACIÓN

Con este proyecto se pretende ofrecer una solución tecnológica para el proceso de reciclaje de madera, en lo que respecta a la granulación del aserrín para posteriores aplicaciones como combustible alternativo y ecológico. Dicho esto, RECICLAJES MYS se encuentra analizando la viabilidad de sistemas automatizados de reciclaje de madera para sus plantas industriales. La empresa ya se encuentra trabajando en el ámbito del reciclaje de madera con tableros para encofrado, tableros armados; además de estos productos, la empresa desea con el diseño de esta máquina automatizada, incursionar en la producción de gránulos o pellets de madera, a partir del aserrín que se desecha de otros procesos, para utilizarlos como combustible ecológico para estufas y hornos domésticos e industriales, debido a las ventajas energéticas que ofrece por sobre otros combustibles similares como la leña.

#### 3.3 OBJETIVOS:

##### GENERAL.

Diseñar y simular una prensa granuladora de madera automatizada de hasta 200 kg/hr, para la empresa RECICLAJES MYS mediante herramientas de diseño y software especializado.

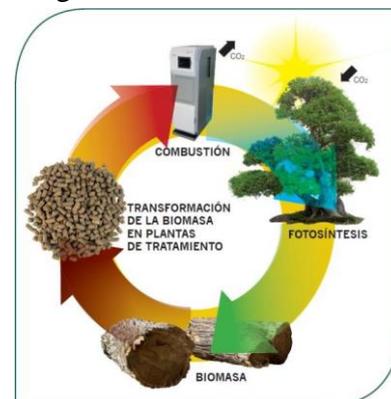
##### ESPECÍFICOS.

- Analizar los sistemas mecánicos de rotación de la máquina y compactación de la materia prima más adecuados para el proceso de granulación de madera según sus requerimientos.
- Analizar los componentes electrónicos para la automatización de la prensa.
- Diseñar los elementos que constituyen la máquina, realizar los planos y simular su funcionamiento.
- Realizar la interfaz y programa para el control y supervisión de la máquina y simular su funcionamiento.
- Realizar un análisis económico del costo de construcción de la máquina.

#### 3.4 MATERIA PRIMA

##### LA BIOMASA

Es cualquier materia orgánica obtenida a partir de vegetales o de animales.



**Figura 2** Producción de biomasa

Fuente: [www.greenheiss.com](http://www.greenheiss.com)

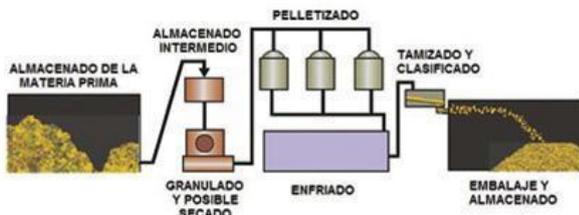
## PINO BLANCO O CARRASCO

Para el presente proyecto la materia prima será el aserrín proveniente del Pino Blanco, el cual es la clase de madera con que trabaja la empresa en la conformación de tableros y encofrados, debido a sus características este aserrín presenta condiciones favorables para su granulación, ya que el pino blanco es una madera suave.

## 4. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE LA PRENSA

### 4.1 CONSIDERACIONES GENERALES

### PROCESO DE PRODUCCIÓN DE GRÁNULOS DE MADERA O PELLETS



**Figura 3** Proceso básico de producción de pellets a gran escala.

Fuente: Technical Research Centre of Finland, 2002

- Recepción de material prima
- Triturado o molienda
- Tolva de alimentación
- Granulación o pelletizado
- Secado
- Enfriamiento
- Almacenaje

### GRÁNULOS DE MADERA O PELLETS

Los gránulos de madera o pellets son un biocombustible estandarizado, cilíndrico (diámetro de 5 a 10mm y longitud de 10 a 30mm), como resultado de la compresión y extrusión de virutas, aserrines y astillas molidas, procedentes de residuos de procesos de transformación de la madera.



**Figura 4** Pellets de madera.

Fuente: [www.ventadebiomasa.wordpress.com](http://www.ventadebiomasa.wordpress.com)

### NORMALIZACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN DE PELLETS

La existencia de una Normativa de calidad sobre pellets y biocombustibles es de vital importancia para el proceso de fabricación y comercialización ya que permiten definir valores límites así como también mostrar las diferentes calidades del producto a los consumidores.

El Comité Europeo de Normalización ha creado la certificación europea para combustibles sólidos **CEN/TS 14961**, en la cual se establecen especificaciones y propiedades para los pellets.

### CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN REQUERIDA

El aserrín se produce como residuo del corte de la madera de pino blanco, este aserrín es de una granulometría menor a 3 mm, es decir muy fina por lo que no requiere de una trituración adicional. La empresa ha realizado un análisis de tiempo de operación y capacidad de producción requerida de acuerdo a la producción, los cuales han concluido con los siguientes parámetros solicitados para la máquina: Capacidad de producción 200 kg/hr.

### 4.2 DESCRIPCIÓN TIPOS DE PRENSAS GRANULADORAS

#### GRANULADORAS DE MATRIZ ANULAR

En este equipo la matriz de anillo tiene una forma cilíndrica y se encuentra en una posición vertical. El mecanismo de compresión está formado por 1 a 3 rodillos de presión que giran sobre la matriz.

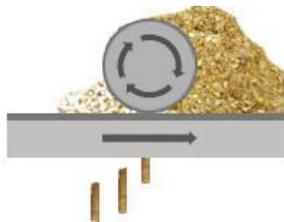


**Figura 5** Esquema movimiento rodillo sobre matriz anular.

Fuente: [www.pelletdies.com](http://www.pelletdies.com)

**GRANULADORAS DE MATRIZ PLANA**

En este tipo de prensa, el mecanismo de compresión consta de una matriz de extrusión plana que se basa en un disco metálico con orificios y equipada con rodillos de presión sobre su superficie.



**Figura 6** Esquema movimiento rodillo sobre matriz plana.

Fuente: [www.pelletdies.com](http://www.pelletdies.com)

**4.3 SELECCIÓN DE SISTEMAS PARA LA PRENSA**

Los dos tipos de prensas granulatoras la de matriz anular y de matriz plana utilizan sistemas muy similares salvo algunas excepciones. Los sistemas dependerán del tipo de prensa granuladora seleccionada.

	Granuladora Matriz Plana	Granuladora Matriz Anular
Producción a gran escala	3	5
Producción mediana y pequeña	5	3
Costo	4	4
Residuos herbáceos	3	5
Residuos forestales	5	4
Facilidad de montaje	5	4
Facilidad de construcción	5	4
Facilidad de mantenimiento	5	4
Sistema de alimentación	4	3
Vida útil	5	3
<b>TOTAL</b>	<b>44</b>	<b>39</b>

**Figura 7** Tabla de decisión selección tipo de prensa granuladora.

Se selecciona el diseño de una prensa granuladora de madera de matriz plana, ya que presenta mayores ventajas sobre la prensa granuladora de matriz anular.

Las prensas granulatoras de matriz plana cuenta por lo general con los siguientes sistemas:

- Sistema de Alimentación: Tolva de alimentación, cámara de compactación.
- Sistema de Potencia: Motor trifásico.
- Sistema de Transmisión: reductor de velocidad, eje de transmisión principal, eje de transmisión de los rodillos.
- Sistema de Compactación: Rodillos de presión, matriz de extrusión.
- Sistema de Corte: Cuchillas de corte, canal de salida.

**SISTEMA DE POTENCIA**

**MOTOR DE INDUCCION TRIFASICO**

También conocidos como motores asíncronos, funcionan a velocidad fundamentalmente constante, desde cero hasta carga completa.El principio de operación de estos motores se basa en la aplicación de la Ley de Faraday y la fuerza de Lorentz en un conductor (Wildi, 2007).



**Figura 8** Partes motor de inducción trifásico.

Fuente: [www.tuveras.com](http://www.tuveras.com)

**SISTEMA DE TRANSMISION**

El movimiento generado por el motor debe ser adaptado a una velocidad y potencia adecuada para el funcionamiento de la prensa granuladora. Por lo cual se requiere de un reductor de velocidad con las características que requiere la máquina. La adaptación se realiza mediante un mecanismo formado por

uno o varios pares de engranajes. Según el tipo de engranajes que utiliza, los reductores de velocidad se pueden clasificar en:

- Alternativa 1 (A1): Reductor de velocidad de sinfín – corona.
- Alternativa 2 (A2): Reductor de velocidad de engranajes.
- Alternativa 3 (A3): Reductor cicloidal.
- Alternativa 4 (A4): Reductor de velocidad planetario.

Requerimientos	Ponderación	Alternativas			
		A1	A2	A3	A4
Cambio dirección transmisión	2	10	8	4	4
Rendimiento		6	10	8	8
Costo	1	5	4	3	3
Vida en servicio		4	4	4	4
Capacidad de carga		4	4	4	4
Mantenimiento		5	4	4	4
Espacio requerido		4	3	5	4
Ruido		5	4	4	4
<b>TOTAL</b>		<b>43</b>	<b>41</b>	<b>36</b>	<b>35</b>

**Figura 9** Tabla de decisión selección reductor de velocidad.

De acuerdo a los resultados se selecciona un reductor de velocidad de tornillo sinfín – corona, para la transmisión de potencia desde el motor hacia el sistema de compactación de la máquina.



**Figura 10** Reductor de sinfín–corona.

Fuente: [www.reductores.net](http://www.reductores.net)

## SISTEMA DE COMPACTACION

### MATRICES DE EXTRUSION

Una vez que la materia prima se encuentra dentro de la cámara de compactación, los rodillos de presión empujan el material al interior de los orificios de la matriz, ya sea esta anular o plana, donde se compacta. Fuera de la cara externa de la matriz de extrusión, el material sale en forma de filamento donde las

cuchillas cortan para dar la forma final de los pellets.



**Figura 11** Matrices de extrusión.

Fuente: [www.pelletdies.com/pelletdie.php](http://www.pelletdies.com/pelletdie.php)

### RODILLOS DE PRESION

Los rodillos ejercen la fuerza de compresión sobre el aserrín para dar forma al pellet. La matriz ofrece la fuerza de resistencia que depende de su espesor, coeficiente de fricción, y diámetro del orificio.



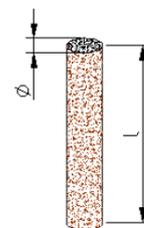
**Figura 12** Rodillo de Presión.

Fuente: [www.peletizadoras.com/Fabricas-de-Pellet-a-pequena-Escala.html](http://www.peletizadoras.com/Fabricas-de-Pellet-a-pequena-Escala.html)

## 5. DISEÑO DE LA PRENSA

### 5.1 FUERZAS DE COMPACTACION

#### CALCULO DEL PELLETT

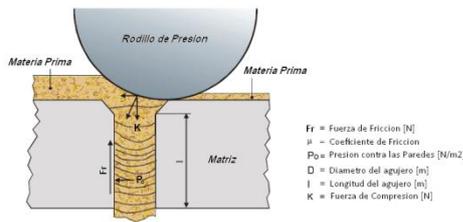


**Figura 13** Dimensiones del Pellet.

Las dimensiones del pellet se determina en base a las especificaciones de la Norma CEN/TS 14691.

## COMPRESION DEL ASERRIN

En este proceso de compresión se generan presiones y fuerzas en el interior del dado.



**Figura 14** Fuerzas de compresión del aserrín.

Fuente: [www.city.north-bay.on.ca](http://www.city.north-bay.on.ca) "Technical Research Center of Finland 2002"

La presión con la cual se comprime en el aserrín en el interior de cada uno de los dados de la matriz está en función de la clasificación de la madera y la deformación que se produce en la extrusión del material.

$$P_{rodillo} = \bar{Y}_f * \epsilon_x$$

Fuente: Groover, Fundamentos de Manufactura Moderna 3ed

Donde:

$\bar{Y}_f$  : Esfuerzo de fluencia (madera).

$\epsilon_x$  : Deformación de extrusión.

$$P_{rodillo} = 199 \text{ MPa} \approx 200 \text{ MPa}$$

## FUERZA DE COMPACTACION DEL RODILLO

La fuerza que el rodillo debe ejercer sobre el dado de la matriz

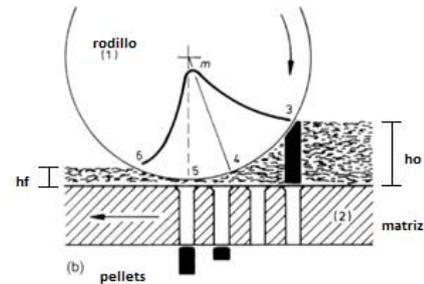
$$K = P_{rodillo} * A_{dado}$$

$$K = 200 \text{ MPa} * \pi * (0.003 \text{ m})^2$$

$$K = 5654.87 \text{ N}$$

## FUERZA Y PRESION EN EL DADO

La presión que se genera en el interior de las paredes del dado (Fig. 15) debido a la fuerza de fricción entre ambos materiales.



**Figura 15** Zona de compresión del aserrín.

$$P_o = \frac{P_f * D}{4 * \mu * h_f}$$

Fuente: Groover, Fundamentos de Manufactura Moderna 3ed

Donde:

$P_o$ : Presión del material comprimido contra la pared del contenedor.

$D$ : Diámetro del pellet.

$\mu$ : Coeficiente de fricción entre la madera y el acero.

$h_f$ : Altura inicial del material antes de pasar por el área de trabajo del rodillo.

$$P_o = 42.9 \text{ MPa}$$

Fuerza de fricción:

$$F_R = \mu * P_o * D * l$$

Fuente: Groover, Fundamentos de Manufactura Moderna 3ed

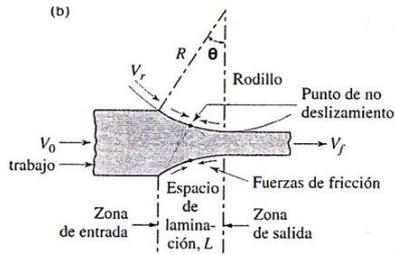
$$F_R = 5400 \text{ N}$$

$$F_R < K$$

$$5400 \text{ N} < 5654.87 \text{ N}$$

## FUERZA DEL RODILLO

La fuerza máxima se puede estimar que actúa a la mitad de la longitud de contacto, ya que en este punto se encuentra la presión pico del rodillo (Groover, 1997).



**Figura 16** Fuerzas que actúan sobre la superficie del rodillo.

Fuente: Kalpakjan, Manufactura 4ed

$$L \approx \sqrt{R(h_o - h_f)}$$

Fuente: Kalpakjan, Manufactura 4ed

$$L \approx 0.05m$$

$$a = L/2$$

$$a = 0.025m$$

### VELOCIDAD DE GIRO RODILLOS

Para el cálculo de la velocidad de giro de los rodillos, partimos de la velocidad con la que estos se desplazan alrededor de la matriz, al estar los rodillos en contacto con la matriz y no haber deslizamiento, la velocidad reflejada sobre los rodillos corresponderá su velocidad de giro. La velocidad se transmite desde el eje hacia los rodillos, se asume un valor nominal de velocidad para el eje, el cual corresponde a la velocidad de salida del reductor de velocidad acoplado al motor que transmite el movimiento al eje principal y este a su vez a los rodillos.

$$v = \omega * d$$

Fuente: (Hibbeler R. C., 2004)

$$v = 2.64 \frac{m}{s}$$

La velocidad de giro o angular de los rodillos está en función del radio de giro, en este caso el radio de los rodillos y la velocidad tangencial, que corresponde a la velocidad con la que avanza en la matriz. Por lo tanto la velocidad angular de los rodillos será:

$$\omega_r = \frac{v}{R}$$

Fuente: (Hibbeler R. C., 2004)

$$\omega_r = 360 \text{ rpm}$$

### POTENCIA DEL RODILLO

Se estima que la fuerza actúa en la mitad del arco de contacto. La potencia requerida para cada rodillo corresponde al producto entre el par de torsión del rodillo y su velocidad angular (Groover, 1997).

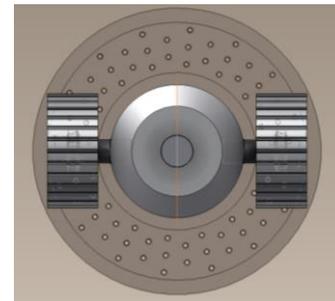
$$P = T * \omega_r$$

Fuente: Kalpakjan, Manufactura 4ed

$$P = \frac{L}{2} * K * 2\pi N$$

$$P_{rodillos} = 10.66 \text{ kW}$$

### MATRIZ DE PRESION



**Figura 17** Esquema de los rodillos de compresión y matriz principal.

Velocidad de extrusión:

En base a las ecuaciones cinemáticas de velocidad lineal se determina la velocidad de extrusión de los pellets. El material sale partiendo del reposo.

$$v_{extrusion} = v_o + a_{extrusion} * t_{extrusion}$$

Fuente: (Hibbeler R. C., 2004)

$$v_{extrusion} = 0.0174 \frac{m}{s}$$

Numero de agujeros de la matriz de extrusión:

El número de agujeros que la matriz debe tener para alcanzar la capacidad de producción establecida se determina en

función de la ecuación del flujo volumétrico de donde se despeja el valor que se necesita, en este caso el número de agujeros de la matriz.

$$Q = (v_{ext} * \#Rodillos) * (A_{dado} * \#Agujeros)$$

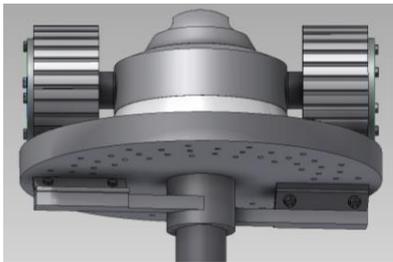
$$\#Agujeros = \frac{0.00007 \frac{m^3}{s}}{(0.0174 \frac{m}{s} * 2rodillos) * (\pi * (0.003m)^2)}$$

$$\#Agujeros = 71.2 \approx 72$$

Se determina que con 2 rodillos y un número mínimo de 72 agujeros en la matriz plana, se obtiene la capacidad de producción deseada.

## 5.2 DISEÑO CUCHILLAS DE CORTE

Cuando el rodillo ha extruido el pellet en su totalidad, alcanzando la longitud de 3cm, inmediatamente un juego de cuchillas giratorias cortan el material, el mismo que cae por gravedad a su posterior proceso de enfriado. Las cuchillas están acopladas al eje principal de la granuladora, por lo tanto poseen la misma velocidad de giro (140 rpm).



**Figura 18** Esquema cuchillas de corte.

## POTENCIA DE CORTE

La potencia necesaria para efectuar el corte se calcula a partir de la dureza del material y del volumen que se debe cortar en la unidad de tiempo.

$$P = R * S * A$$

Fuente: (Vignote Peña & Martínez Rojas, 2005)

$$P = 0.194 \text{ kW}$$

## POTENCIA TOTAL REQUERIDA DE TRABAJO

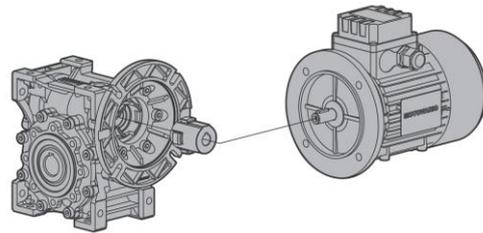
$$P_{Total} = P_{rodillos} + P_{cuchillas}$$

$$P_{Total} = 10.854 \text{ kW}$$

## 5.3 SISTEMA DE TRANSMISION Y EJES

### SELECCIÓN DE LA TRANSMISION

Un motorreductor de tornillo sin fin, ofrece la ventaja de constar de un motor y una caja reductora de velocidad acoplados. El motorreductor entregará la potencia al eje principal, así como la velocidad requerida para realizar el trabajo de granulación.



**Figura 19** Esquema acoplamiento Motorreductor de tornillo sin fin.

Fuente: [www.motovario-group.com/esp](http://www.motovario-group.com/esp)

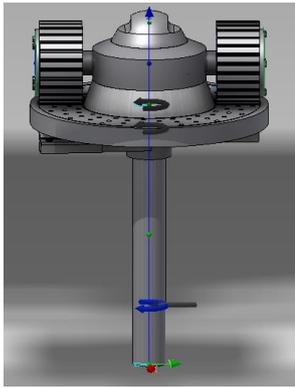
MOTOVARIO		Mikroreductor a vite senza fine / Mikrom-Grandreducer / Mikroreductor a vite senza fine / Schneckengetriebene Motoren / Mikroreductor de tornillo sin fin / 40/50/60/75/90/110/132		NMRV / NMRVpower		
15,00 kW						
n2 [1/min]	M2 [Nm]	f.s.	i	Fr [kg]	Fr [kg]	
180,7	699	1,7	7,5	NMRV150	180L4	892
140,0	921	1,3	10	NMRV150	180L4	763
93,3	1351	0,9	15	NMRV150	180L4	871
70,0	1781	0,7	20	NMRV150	180L4	854

**Figura 20** Selección de modelo de motorreductor.

Fuente: Catalogo Motorreductores de sinfín Motovario

## DISEÑO DEL EJE PRINCIPAL

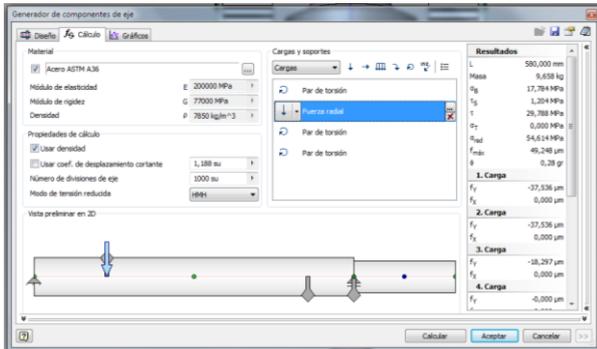
Las fuerzas producidas por la transmisión, las cuchillas y los rodillos originan torques en el eje principal. En la figura 21 se observa un esquema general de los mecanismos de transmisión y de compactación, a partir de los cuales se determinan las fuerzas y torques que intervienen en el diseño del eje.



**Figura 21** Esquema eje de transmisión principal.

Simulación:

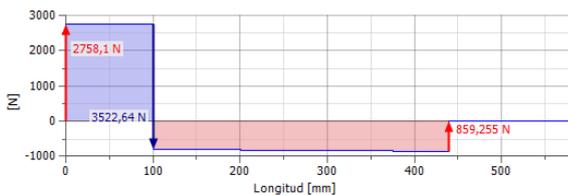
Utilizando la herramienta del Generador de componentes de eje de Autodesk Inventor 2012, podemos simular las cargas que se ejercen sobre el eje de transmisión. Para simular se ingresa la información referente al material del mismo el cual se ha escogido un Acero ASTM 36.



**Figura 22** Diagrama de cuerpo libre en el Simulador.

Fuente: Design Accelerator, Generador componentes de eje, Inventor 2012

Fuerza de corte:



**Figura 23** Gráfica de la fuerza de corte en el eje principal.

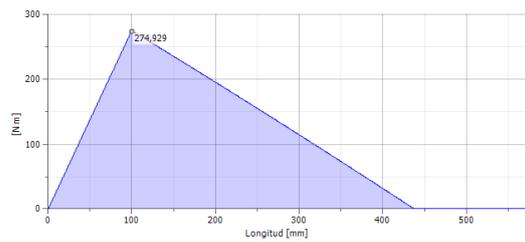
Fuente: Design Accelerator, Generador componentes de eje, Inventor 2012

Resultados:

Valor Calculado	Valor Simulación Inventor	%Error
RA= 800 N	RA= 859.225 N	7.4%
RB= 2720 N	RB= 2758.1 N	1.4%

**Tabla 1** Resultados simulación fuerza de corte.

Momento flector:



**Figura 24** Gráfica del Momento flector en el eje principal.

Fuente: Design Accelerator, Generador componentes de eje, Inventor 2012

Resultados:

Valor Calculado	Valor Simulación Inventor	%Error
272 Nm	274.929 Nm	1.08%

**Tabla 2** Resultados simulación momento flector.

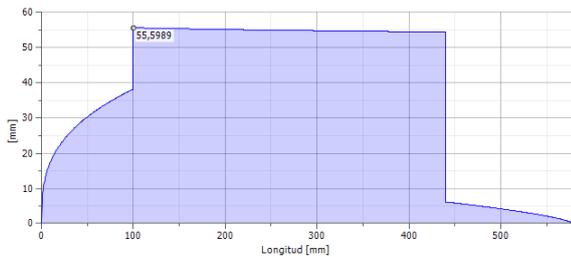
Diametro eje principal

El diámetro mínimo del eje sometido a flexión y torsión se calcula mediante la ecuación:

$$d = \left[ \frac{32 * N}{\pi * S_y} (M^2 + T^2)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{3}}$$

Fuente: (Norton, 1999)

$$d = 54 \text{ mm} \approx 2.12 \text{ in}$$



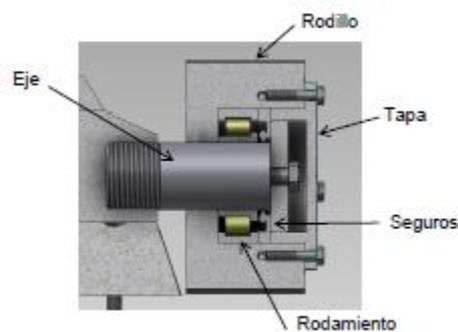
**Figura 25** Gráfica diámetro mínimo del eje principal.

Fuente: Design Accelerator, Generador componentes de eje, Inventor 2012

Para la sección del eje superior a los 440 mm en la cual el grafico revela que no se requiere un diámetro elevado se reducirá el eje a un diámetro de 45mm, para el resto del eje será el valor calculado de 54 mm.

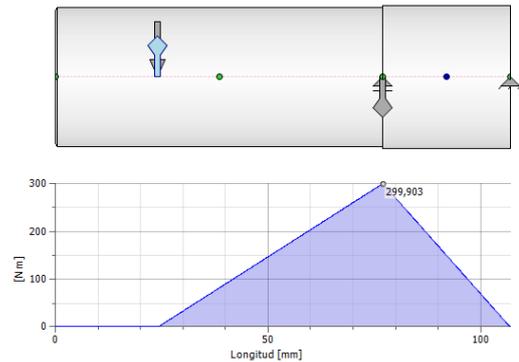
#### CALCULO DEL EJE DE LOS RODILLOS

El eje esta acoplado en un extremo con el rodillo de compactación y en el otro extremo con el cabezal de giro tal como se observa en la figura 26.



**Figura 26** Eje porta rodillos.

Se realiza el mismo procedimiento de simulación y calculo como en el eje principal.



**Figura 27** Diagrama de Momento del eje porta rodillo.

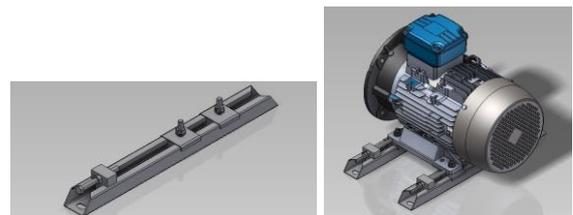
Fuente: Design Accelerator, Generador componentes de eje, Inventor 2012

$$d = 37 \text{ mm} \approx 1.46 \text{ in}$$

#### SOPORTE O BASE Y CARCAZA DE LA PRENSA

Base del motor:

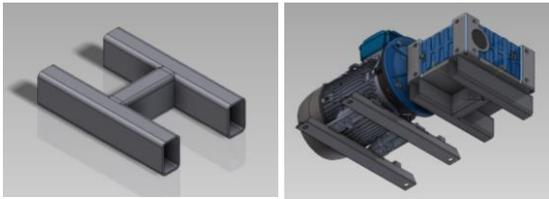
Para sujetar el motor de la máquina, seleccionamos un carril tensor de línea en acero galvanizado, que permite la fijación y regulación de todos los tipos de motores eléctricos en diferentes posiciones.



**Figura 28** Carril tensor de línea para motor eléctrico.

Base de la caja reductora:

Se usara una estructura de acero S235JR que soportara el peso del reductor de velocidad, la cámara de compactación y el silo de alimentación, junto con el peso del material.



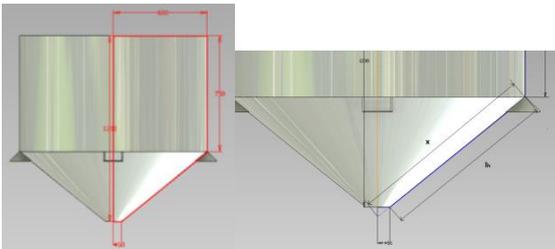
**Figura 29** Estructura de soporte para caja reductora.

#### 5.4 SISTEMA DE ALIMENTACION

El material se recoge en un contenedor una vez cada hora y se transporta por medio de un montacargas hacia el área de la prensa granuladora de madera. La cantidad de aserrín que se recoge por cada hora es de  $1\text{m}^3$ .

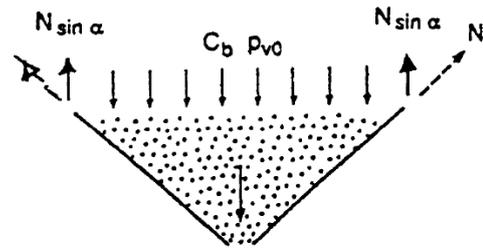
#### TOLVA DE ALIMENTACION

Las cargas en la tolva, dependen de las propiedades de la materia prima, las condiciones de rozamiento y la geometría de la tolva. Los dos factores que más determinan el tipo del flujo en el silo son, el ángulo de inclinación de la tolva y el ángulo de fricción ente las paredes del silo y el material (Moya, 2004). El recipiente será de fondo cónico y carcasa cilíndrica.



**Figura 30** Dimensiones de la tolva.

Para el diseño del soporte de la tolva, es necesario conocer la componente vertical que ejerce la tolva sobre el soporte. Dicha componente vertical se determina por un equilibrio de fuerzas, añadiendo una sobrecarga vertical de valor  $C_b * P_{v0}$  a nivel de la zona de transición, más el peso del contenido de la tolva.



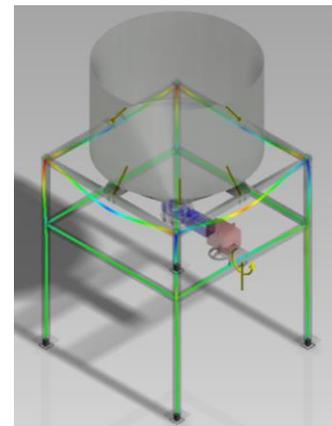
**Figura 31** Reacciones en apoyos de la tolva.

$$N * \sin \alpha = \frac{C_b * P_{v0} + P}{2}$$

La tolva tiene 4 soportes equidistantes a lo largo del perímetro de la zona de transición, a los cuales se fijara la estructura metálica, por lo tanto la carga sobre cada uno de estos será:

$$q_t = \frac{N * \sin \alpha}{2}$$

$$q_t = 51,016 \text{ kg}$$



**Figura 32** Esquema soporte estructural silo.

El acero escogido para la estructura es el S235JR, se decide utilizar un perfil cuadrado hueco de  $50 \times 50 \times 4$ . Calculamos el esfuerzo máximo en el soporte vertical que presenta las condiciones de esfuerzo más desfavorables.

$$\sigma_{MAX} = \frac{S_x}{A} + M_x + M_y \leq \sigma_{ADM}$$

$$\sigma_{MAX} = 20,7 \text{ MPa} \leq 156,9 \text{ MPa}$$

Calculamos el esfuerzo en la viga horizontal:

$$\tau_{PROM} = 1,44 \frac{N}{mm^2} < 66,67 \frac{N}{mm^2}$$

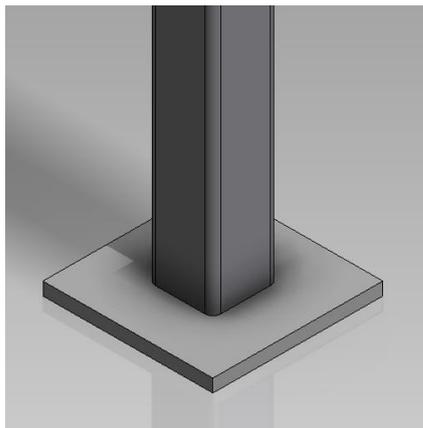
Placas de anclaje:

En compresión compuesta las armaduras están básicamente solicitadas a compresión.

Como cuantía mínima se adopta:

$$A_s * f_{yd} \geq 0,1 N_{ED}$$

Fuente: (Medina Sanchez, 2008)



**Figura 33** Placa anclaje soporte estructural.

## 6. AUTOMATIZACIÓN DE LA PRENSA

Para el presente proyecto se pretende controlar el funcionamiento de la prensa granuladora de madera, para lo cual se requiere regular el ingreso de aserrín a la cámara de granulación, ya que del nivel de aserrín dependerá de que los rodillos compactadores trabajen sobre una cantidad de material suficiente para formar el granulo de madera. Una vez que el material es extruido se realiza el corte del material, mediante un mecanismo de cuchillas que giran en el sentido del eje principal de la máquina, el producto queda formado y sale de la máquina hacia el siguiente proceso.

### OBJETIVOS DEL SISTEMA DE CONTROL.

- Controlar el ingreso de material a la cámara de granulación.

- Control de nivel del material en la cámara.
- Detectar atascos en el sistema.

### SELECCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

Se plantean las siguientes alternativas:

- Alternativa 1 (A1): PLC.
- Alternativa 2 (A2): Microcontrolador.
- Alternativa 3 (A3): Contactores.

Parámetros	Alternativas		
	A1	A2	A3
Versatilidad	4	3	1
Costo	1	4	3
Mantenimiento	3	3	4
Conexión al puesto de mando	4	3	3
Instalación	4	3	1
Trabajo en ambiente hostil	4	2	3
<b>TOTAL</b>	<b>20</b>	<b>18</b>	<b>15</b>

**Tabla 3** Tabla de decisión selección sistema de control

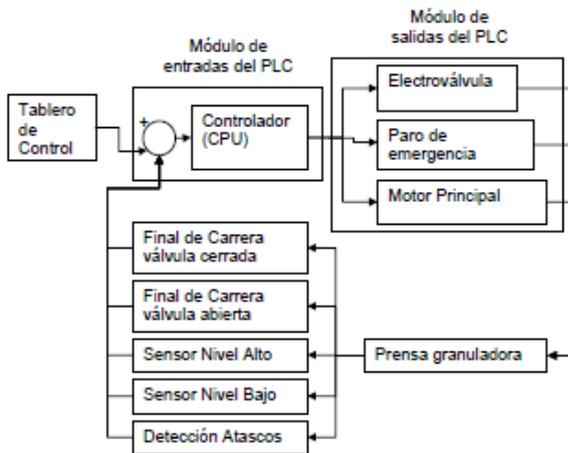
De acuerdo a los resultados se escoge diseñar el control por PLC, ya que presenta las mayores ventajas.

### 6.1 SECUENCIA DE TRABAJO



**Figura 34** Secuencia de trabajo de la prensa granuladora de madera.

## 6.2 CONFIGURACION DEL SISTEMA



**Figura 35** Diagrama de bloques de la configuración del sistema.

## 6.3 SENSORES Y ACTUADORES

### SENSOR DE NIVEL

Para la medición de nivel del aserrín en la cámara de compactación, debido a las características del material, para su detección es adecuado usar sensores de nivel de sólidos. Dentro de los detectores de nivel de sólidos se encuentran:

#### Detectores de Nivel de Punto Fijo.

Proporcionan una medida en uno o varios puntos fijos determinados dentro de un recipiente. Los sistemas más empleados son el diafragma, el cono suspendido, la varilla flexible, el medidor conductivo y las paletas rotativas.

#### Detectores de nivel continuos.

Proporcionan una medida continua del nivel de los sólidos desde el punto más bajo al más alto. Entre los instrumentos empleados frecuentemente se encuentran el medidor de nivel de sondeo electromecánico o de peso móvil, el medidor de nivel de báscula, el medidor de nivel capacitivo, el medidor de presión diferencial, el medidor de nivel de ultrasonidos, el medidor de radar de

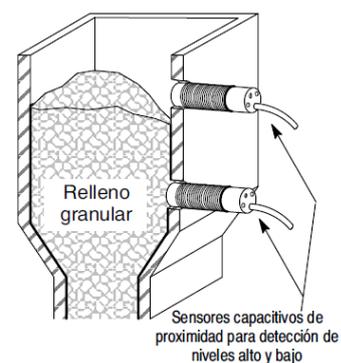
microondas y el medidor de nivel de radiación.



**Figura 36** Sensores de nivel de sólidos.

Fuente: [www.industriaynegocios.cl](http://www.industriaynegocios.cl)

Para el presente proyecto se necesita detectar los niveles mínimo y máximo del aserrín dentro de la cámara de compactación, por lo que los medidores de punto fijo, serían los más adecuados, dentro de esta categoría, se selecciona el medidor capacitivo, ya que presenta las características adecuadas



**Figura 37** Esquema detección de nivel sensores capacitivos de punto fijo.

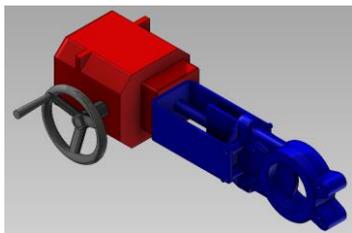
Fuente: [www.ab.com/catalogs](http://www.ab.com/catalogs)

Se selecciona el sensor de Allen Bradley 875CP de 3 cables de corriente continua, ya que cumple con las características requeridas para el proyecto, es de la misma marca del PLC, existe facilidad de funcionamiento.



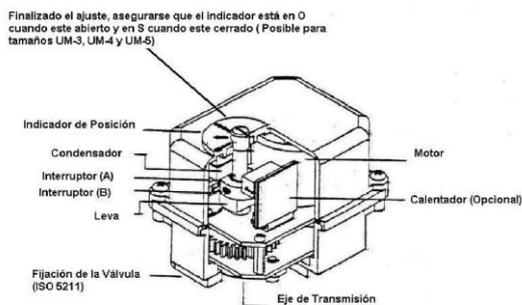
**Figura 38** Sensor de nivel capacitivo 875CP de 3 cables Allen Bradley.  
Fuente: [www.ab.com/catalogs](http://www.ab.com/catalogs)

**COMPUERTA ENTRADA DE MATERIAL**  
Se hace uso de una compuerta con accionamiento eléctrico, podemos encontrar diferentes tipos de accionamientos para esta aplicación. Se selecciona una válvula de compuerta PROINVAL BVP DN100 acoplado con un actuador eléctrico monofásico UM-3 de la misma marca.



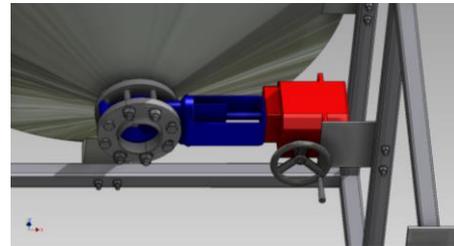
**Figura 39** Válvula de compuerta PROINVAL BVP DN 100 con actuador eléctrico.  
Fuente: [www.proinval.eu](http://www.proinval.eu)

Actuador eléctrico de la válvula:  
Después de comprobar la fijación mecánica a la válvula, se conectan los terminales de acuerdo al esquema eléctrico correspondiente. El equipo tiene dos interruptores limitadores de posición abierto o cerrado, los cuales se activan dependiendo de la posición de la leva.



**Figura 40** Componentes actuador eléctrico de la válvula.

Finalmente la válvula se fija mediante bridas a la salida de la tolva y se coloca una base fijada a la estructura, la cual sostiene al actuador eléctrico de la válvula.



**Figura 41** Ubicación de la válvula de compuerta.

**SELECCIÓN DEL CONTROLADOR (PLC)**  
El PLC es un dispositivo electrónico digital encargado de manejar el funcionamiento de una máquina o proceso a través de la ejecución de un programa.

**REQUERIMIENTOS DE ENTRADAS Y SALIDAS.**

	<b>ENTRADAS (Digitales)</b>	<b>SALIDAS (Tipo Relé)</b>
1	Encender máquina	Abrir compuerta
2	Apagar máquina	Cerrar compuerta
3	Marcha/Paro	Indicador máquina encendida
4	Sensor nivel máximo	Indicador estado motor
5	Sensor nivel mínimo	Indicador alarma
6	Paro de emergencia	Indicador estado compuerta
7	Abrir compuerta válvula	
8	Cerrar compuerta válvula	
9	Llenado cámara	
10	Simulación	
<b>To</b>	<b>10</b>	<b>6</b>

**Tabla 5** Requerimientos de entradas y salidas.

**EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS.**

Para llevar a cabo la selección del PLC más conveniente para este proyecto, se debe realizar una evaluación para determinar la marca, debido a las posibilidades que ofrece el mercado.

Características	Opciones		
	Allen Bradley	Siemens	Omron
Prestaciones	4	3	3
Comunicaciones	4	4	3
Facilidad Programación	4	3	2
Costo	4	3	4
Instalación	4	4	4
Mantenimiento	4	4	4
<b>TOTAL</b>	<b>24</b>	<b>21</b>	<b>20</b>

**Tabla 6** Matriz de decisión marca de PLC.

La marca seleccionada para el controlador es Allen Bradley, ya que presenta mayores ventajas. Para la selección del modelo que se requiere para el proyecto analizamos los requerimientos de entradas y salidas, así como las condiciones de trabajo mencionadas anteriormente. Se utilizara un PLC – Allen Bradley Micrologix 1000, ya que presenta las características adecuadas para este proyecto.



**Figura 42** Allen Bradley Micrologix 1000. Fuente: ab.rockwellautomation.com

**DESARROLLO PROGRAMA DE CONTROL**

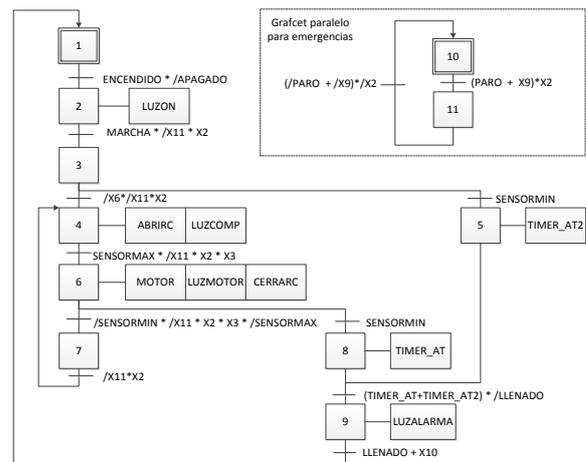
Para el desarrollo del programa del PLC, se utilizara el software RSLogix 500, que trabaja

con plcs Allen Bradley de la serie SLC 500 y Micrologix.

**Software RSLogix 500**

Este software de Rockwell Automation utiliza programación del tipo ladder para el desarrollo de instrucciones. También nos permite verificar el proyecto y editar posibles errores. El ambiente del programa es compatible con Microsoft Windows y permite comunicarse con cualquier procesador por puerto Ethernet o serial. El uso de direcciones es a través de símbolos establecidos por el usuario.

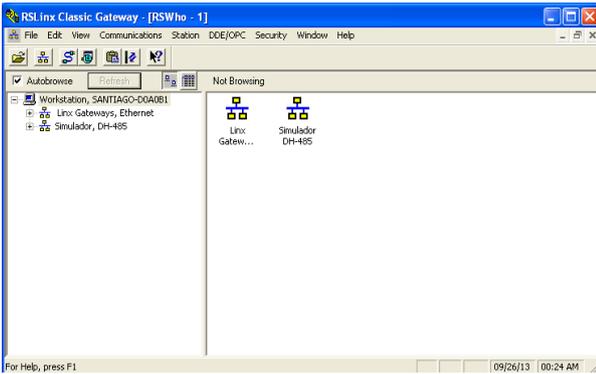
**GRAFICET DEL PROCESO**



**Figura 43** Graficet del proceso.

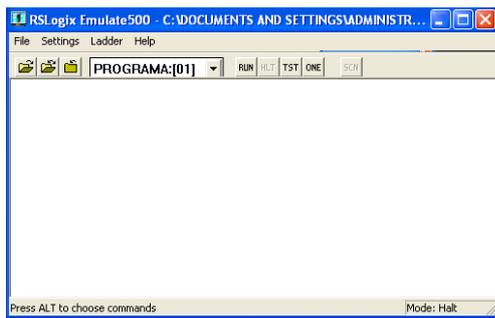
**COMUNICACIÓN DEL SISTEMA**

Para la simulación del sistema de control, utilizamos un software RSLinx de Allen Bradley el cual nos permite comunicar el PLC y el ordenador, usando los protocolos de comunicación para los distintos modelos de hardware.



**Figura 44** Pantalla RSLinx Classic.

Para completar la simulación del PLC utilizamos el software RSLogix Emulate 500 de Allen Bradley que simula la presencia de un PLC real conectado al ordenador. El RSLogix Emulate 500 ejecuta el programa ladder en el ordenador, lo cual nos permite tener una aproximación a lo que ocurrirá cuando descarguemos el programa en el PLC.



**Figura 45** Pantalla RSLogix Emulate 500.

**DESARROLLO INTERFAZ DE CONTROL**  
Para el diseño de la interfaz se va a utilizar el Software Wonderware Intouch para el control, monitoreo y mando de la máquina.



**Figura 46** Pantalla inicial Wonderware Intouch 10.

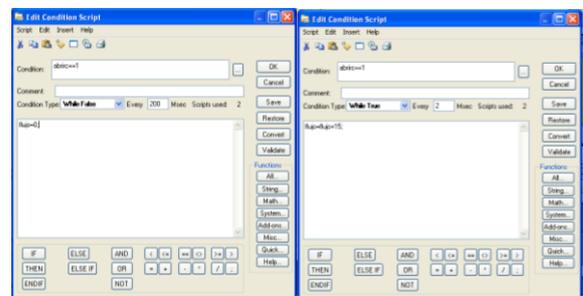
En cuanto al diseño del HMI se tomaran en cuenta las recomendaciones de la guía GEDIS. El objetivo de realizar una simulación de la Interfaz Humano Máquina es comprobar el funcionamiento de la comunicación entre el programa del PLC la Interfaz Humano Máquina, además sirve para comprobar la lógica del PLC. La simulación de la interfaz se realizara con el software Wonderware Intouch.

Las pantallas del HMI están divididas de acuerdo al funcionamiento y a los requerimientos de la máquina.



**Figura 47** Ventana de inicio interfaz gráfica.

La programación del funcionamiento de las pantallas se realiza mediante scripts, los cuales permiten la animación de gráficos mediante variables creadas dentro del programa. Los scripts pueden activarse por medio de condiciones o ejecutarse durante la aplicación.



**Figura 48** Script de condición.

## SISTEMA ELECTRICO

El sistema eléctrico es el encargado de alimentar a los demás sistemas de la prensa, por ejemplo los dispositivos electrónicos (PLC) y el sistema de potencia de la máquina (motor), también ayuda a controlar su correcto funcionamiento y proteger de posibles daños como cortocircuitos o sobrecargas.

Dispositivo	Cantidad	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (KW)	Protección (15%)	Observaciones	Marca	Nº Parte
Motor	1	440	38	16,72	43,7	Guardamotor de 40 a 45 A, SET en este rango	Allen Bradley	140M-F8E-C45
Fuente de poder	1	120	5	0,600	5,8	Breaker unipolar C6 120 VAC	Allen Bradley	1492-SP1C060
PLC Micrologix 1100	1	120	1	0,12	1,2	Breaker unipolar C2 120 VAC	Allen Bradley	1492-SP1C020
Transformador 1500 VA	1	480			9,2	Breaker bipolar C10 480 VAC ( C2 + C6)	Allen Bradley	1492-SP2C100
Válvulo de galletina	1	24	0,5	0,012				
Sensor capacitivo para sólidos	2	24	0,5	0,024				
Luz piloto	4	24	0,25	0,024				
Pulsador/selector	7	24	0,25	0,042				
Contacto bobina	1	24	1	0,024		Contacto para motor de 30 HP, 440VAC	Allen Bradley	100-C43

Carga Total 46,5

**Tabla 7** Dimensionamiento, especificación de protecciones.

## 7. ANÁLISIS ECONÓMICO

COSTOS	VALOR
COSTOS DIRECTOS	\$ 8642,60
COSTOS INDIRECTOS	\$ 2220,00
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 10862,60</b>

**Tabla 8** Costo total.

## BALANCE DE ENERGÍA

Podemos establecer una rentabilidad energética del sistema, comparando la energía necesaria para producir los pellets y la que estos entregan al ser quemados.

Consumo de energía para formar los gránulos:

Dispositivos	Consumo eléctrico (kwh)
Granulación	16,2
Corte	8
Secado	10
Almacenaje	7
Caldera	12
<b>TOTAL</b>	<b>53,2 kwh</b>

**Tabla 9** Energía para formar los pellets.

Energía que entregan los gránulos al ser quemados en calderas:

Poder calorífico pellets	4600 kcal/kg =
	5,35 kwh/kg
Porcentaje de masa aprovechable	92%
Eficiencia caldera	87%

**Tabla 10** Energía que entregan los pellets.

$$5,35 \frac{kwh}{kg} \times 15 kg(saco) =$$

$$80,25 kwh \times 0,92 \times 0,87 = 64,2 kwh$$

*Energía necesaria para producir pellets*

*Energía que entregan los pellets*

$$= \frac{64,2 kwh}{53,2 kwh} = 1,2$$

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

- El diseño de la prensa granuladora de madera cumple con los requerimientos de la empresa RECICLAJES MYS, con el objetivo de plantear una solución para el reciclaje de un subproducto de la madera como es el aserrín y con esto contribuir al medio ambiente.
- La prensa granuladora se diseñó con un factor de sobreproducción del 20%, por lo tanto la máquina es capaz de llegar a los 240 kg/hr.
- En el mercado regional se pueden encontrar prensas granuladoras de madera a un precio similar al de este proyecto, pero dichas máquinas son netamente electromecánicas, no cuentan con un sistema de control, electrónico, es decir no están automatizadas. El mercado ecuatoriano no cuenta con este tipo de máquinas para la industria de reciclaje.

- La prensa granuladora vertical, que fue la clase de prensa escogida, presenta mayores ventajas sobre la horizontal, sobre todo en su eficiencia y menor complejidad de diseño.
- La transformación del aserrín a pellets se produce por la combinación de fuerzas de compactación y extrusión. Primero el material pasa por laminación, ya que el avance del rodillo obliga al material a pasar por debajo de este, y extrusión, ya que el aserrín una vez debajo del rodillo es presionado a través de los dados de la matriz para ser compactado y extruido.
- Para la esquematización, simulación, gráficos, y diseño de los componentes mecánicos de la máquina, el software “Autodesk Inventor 2012” fue una herramienta importante, además de su facilidad de manejo.
- Si bien la máquina fue diseñada para comprimir aserrín, puede también ser usada para compactar otra clase de material granular que se requiera granular, reciclar, siempre y cuando sea de características similares a las del aserrín, como por ejemplo el bagazo, etc.
- El sistema de control brinda flexibilidad a la máquina, además la interfaz gráfica con la que trabajará el operador es práctica e intuitiva, acorde a las necesidades del sistema. El programa de control fue simulado para visualizar una aproximación del funcionamiento de la secuencia de la máquina.
- El análisis económico da como resultado que el Valor Actual Neto (VAN) es mayor a la inversión, así como también que la Tasa Interna de Retorno (TIR) es mayor a la tasa de interés fija que se plantea del 20%, por lo tanto el proyecto es rentable para la empresa.

## RECOMENDACIONES

- Si bien la prensa granuladora puede producir hasta 240 kg/hr debido al factor de sobreproducción con la que fue diseñado, es recomendado utilizarlo a su capacidad nominal que es de 200 kg/hr.
- Se deben tomar las debidas precauciones de seguridad tanto para la máquina como para el operario, si se realizan adecuaciones adicionales se puede exceder la capacidad de trabajo de la prensa granuladora.
- Es importante mantener en buen estado los rodillos de presión y la matriz extrusora, así como la lubricación de los sistemas de transmisión y compactación, para evitar daños en la máquina.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

### Libros Consultados

- Bayer, J. F. (2009). *Gasificación de biomasa* (Primera ed.). Antioquia, Colombia: Universidad de Antioquia.
- Budynas-Nisbett. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (Octava ed.). Mc Graw Hill.
- Campos Michelena, M., & Marcos Martín, F. (2008). *Los Biocombustibles* (Segunda ed.). España: Mundi Prensa.
- Carbó, C. B. (1995). *Alimentos y Racionamiento*. Madrid: Mundi-Prensa Libros.
- Cortizo Rodríguez, J. (2004). *Elementos de máquinas: teoría y problemas*. Oviedo: Universidad de Oviedo.
- Damien, A. (2010). *LA BIOMASA: Fundamentos, Tecnologías y Aplicaciones*. Paris: A. MADRID VICENTE.
- Groover, M. P. (1997). *Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales,*

- Procesos Y Sistemas*. Mexico: Prentice-Hall.
- Harper, G. E. (2004). *Instalaciones y Montaje Electromecánico*. Mexico: LIMUSA.
- Hibbeler, R. (2006). *Mecánica de Materiales* (Sexta ed.). México: PEARSON EDUCACIÓN.
- Hibbeler, R. C. (2004). *Mécanica vectorial para ingenieros. Dinámica* (Décima ed.). México: PEARSON EDUCACION.
- Javier Ábrego Garrués, F. S. (2010). *Energía de la Biomasa*. Zaragoza.
- Jiménez Boulanger, F., Espinoza Gutiérrez, C. L., & Fonseca Retana, L. (2007). *Ingeniería Económica* (Primera ed.). Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Mexico: PEARSON EDUCACIÓN.
- Medina Sanchez, E. (2008). *Construcción de estructuras de hormigón armado* (Segunda ed.). Madrid: Delta Publicaciones.
- Norton, R. L. (1999). *Diseño de Máquinas*. México: PEARSON.
- Vignote Peña, S., & Martínez Rojas, I. (2005). *Tecnología de la Madera* (Tercera ed.). Madrid: Mundi-Prensa.
- Wildi, T. (2007). *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia* (Sexta ed.). (P. M. Guerrero Rosas, Ed.) México: Pearson Educación.
- Jaya Shankar, T., Christopher, T. W., Kevin, L. K., & J. Richard, H. (Agosto de 2010). *Idaho National Laboratory*. Recuperado el Octubre de 2012, de [www.inl.gov/technicalpublications/Documents/4886679.pdf](http://www.inl.gov/technicalpublications/Documents/4886679.pdf)
- Mancok, C. P. (2007). *Flujo de medios granulares en la descarga de silos bajo la acción de la gravedad*. Pamplona.
- Moya, D. F. (2004). *Silos y Tanques en concreto reforzado – Cálculo Estructural Simplificado*. Madrid: Universidad del Valle.
- Pellet Fuels Institute*. (2013). Obtenido de <http://pelletheat.org/>
- WEG INDUSTRIAS S.A. (s.f.). *Eaco*. Recuperado el 6 de Enero de 2013, de [www.eaco.com.mx/MANUALWEG.pdf](http://www.eaco.com.mx/MANUALWEG.pdf)

### Tesis Consultadas

- Arpi, J., & Calderón, C. (2010). *Diseño de una máquina peletizadora en base a la disponibilidad de residuos madereros de la ciudad de Cuenca*. Tesis de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana; Cuenca.

### Publicaciones

- AENOR. (1997). *Norma Experimental UNE-ENV 1991-4: 1997*.
- Catalán, J. R. (1992). *Silos*. Barcelona: IMGESA.
- ITEBE- *European Technical Institute for Wood Energy*. (2013). Obtenido de <http://www.managenergy.net/actors/208>