

MÁQUINA DESVAINADORA DE FRÉJOL SECO

Álvarez Játiva Luis Hernán,
Carrera de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Técnica del Norte
Ibarra, Ecuador
luis_hernan@hotmail.es

Resumen— Este proyecto presenta el diseño y construcción de una máquina desvainadora de fréjol seco, con el objetivo de aumentar la rapidez de desgranado de fréjol, reduciendo el costo de la mano de obra y mejorando las condiciones de vida de los agricultores.

Para conseguir el objetivo planteado se inició con el diseño del sistema mecánico y de control para la máquina desvainadora de fréjol seco; se procedió con su construcción optimizando costos en la fabricación enfocándose en los agricultores y pequeños comerciantes que deseen adquirirla a un precio conveniente. Una vez construida la máquina se procedió a realizar pruebas de funcionamiento y manejo de la misma permitiendo corregir errores y realizar ajustes necesarios para lograr el funcionamiento óptimo de la máquina. Finalmente, se elaboró un manual de usuario y mantenimiento de la máquina para que las personas que la adquieran tengan el soporte necesario al momento de utilizarla sin problema alguno.

La máquina desvainadora de fréjol seco ocupará un área física de $2m^2$ aproximadamente; el proceso de desvainado empezará con el ingreso del fréjol seco a la tolva de alimentación soportando una capacidad de 25 libras de fréjol seco incluida su vaina. Posteriormente entrará en una cámara donde será desvainado por un sistema de paletas que girarán a altas velocidades generando impactos y así provocara la separación de la vaina con el fréjol; la vaina será expulsada de la máquina a través de la zona de ventilado mediante centrifugado mientras que el fréjol caerá por gravedad hacia una malla ubicada en la salida.

Esta máquina estará accionada por un motor de CA a 110/220 V que proporcionará movimientos a un eje mediante un sistema de transmisión por bandas al sistema de desgranado de fréjol. Poseerá un tablero de encendido, apagado y parada de emergencia de la máquina con su respectivas seguridades; adicional se podrá controlar la máquina a través de un sensor el que verificara si la máquina está siendo utilizada por el usuario caso contrario se apagará automáticamente beneficiando el ahorro de energía

Abstract— This Project presents the design and construction of a husking machine for dry beans, its objective is to increase the shelling speed of the beans, reducing the labor cost and improving the living conditions of farmers. To achieve the stated goal, it was started with the mechanical system design and control of the husking machine for dry

beans; it was proceed with its construction by optimizing the machine manufacturing costs focusing on farmers and small traders who wish to purchase it at an affordable price. Once the machine was constructed we proceeded to test the functioning and management of it allowing correcting errors and performing necessary adjustments to achieve the optimal operation of the machine. Finally, a user manual and machine maintenance for people who have acquired the machine have the necessary support when the use it without any problem was developed.

The husking machine of dry beans will occupy approximately a physical area of $2m^2$; the shucked process will start with the entry of the dry beans to a feeding hopper supporting a capacity of 25 pounds of dry beans including its sheath. Subsequently it enters into a chamber where it will be shelled by a system of vanes that rotate at high speeds and generates impacts causing the separation of the beans from the sheath; the sheath will be expelled from the machine through the ventilated area by centrifugation while the beans will fall by gravity towards a mesh located at the exit of the machine.

This machine will be operated by an AC motor at 110/220 V to provide motion to an axle via a transmission system by bands to the husking beans system. It will have an on, off and an emergency stop table of the machine with their respective securities; additional, the machine will be controlled through a sensor that checks whether the machine is being used by the user or on the contrary it will automatically turn off benefiting the energy save.

I. NOMENCLATURA

Rapidez, costo, Fréjol seco, Desvainadora, Tolva, Centrifugado, Motor, Tablero, Sensor, Automático, Paletas, Eje, Bandas.

II. INTRODUCCIÓN

El fréjol o *Phaseolus vulgaris* es un alimento que se ha cultivado desde hace alrededor de 8 mil años, formando parte de la dieta de las personas por sus propiedades alimenticias ricas en proteínas y en fibra.

En nuestro país, se lo conoce como fréjol o poroto y es muy común servirlo con arroz y carne de res, pollo cerdo o pescado.

En el Norte del Ecuador un alto porcentaje de los agricultores se dedican a la siembra de esta planta por su buena comercialización y rentabilidad. Se lo puede sembrar en climas fríos y cálidos por su característica de adaptabilidad de sus diferentes variedades, las cuales son 150 en todo el mundo y 50 en el Ecuador.

La cosecha de esta leguminosa se la realiza 4 meses después de su siembra, cuando las vainas se abran fácilmente al presionarlas con la mano.

Una vez extraída la vaina de la planta se procede a seleccionar el fréjol tierno y el seco; el fréjol tierno se lo encostala para su comercialización al mayorista y el fréjol seco entra en un proceso de desvainado, el cual es arduo, conlleva tiempo, dinero y es muy trabajoso. Tradicionalmente los agricultores lo realizan tendiendo el fréjol seco en un área extensa sobre el piso y lo dejan al sol varias horas para que la cáscara que lo cubre se deshidrate y luego el desvainado se lo realiza mediante golpes con trozos de madera durante horas dependiendo de la cantidad a desvainar.

Este método que utilizan los agricultores no es ergonómico, puesto que en el momento que realizan los golpes al fréjol, tienen que agacharse o arrodillarse, afectando su postura, provocando dolores fuertes de espalda, cansancio e incomodidad en esta labor agrícola.

Todo este proceso afecta en el rendimiento diario de fréjol disponible para que el comerciante lo puedan sacar a la venta; otro inconveniente es que dependiendo de su contenido de humedad el fréjol seco corre el riesgo de dañarse ocasionando pérdidas económicas.

III. FUNDAMENTO TEÓRICO

Entre las variedades de fréjol más cultivadas en el Ecuador tenemos el fréjol arbustivo y el fréjol voluble o trepador.

A. *Fréjol arbustivo*

El nombre científico de esta variedad de fréjol es *Phaseolus vulgaris* L., su centro de origen es en América (Mesoamérica, Zona Andina). En el Ecuador se lo cultiva en los valles: El Chota, Salinas y Mira (Imbabura, Carchi), Guayllabamba y Tumbaco (Pichincha), Patate (Tungurahua), Gualaceo y Yunguilla (Azuay), Vilcabamba, Catamayo, Malacatos (Loja) y en las estribaciones de cordillera: Intag (Imbabura), Noroccidente de Pichincha, El Corazón (Cotopaxi), Chanchán y Huigra (Chimborazo), Pallatanga (Chimborazo y Bolívar) y Chillanes (Bolívar), Javin y Chontamarca (Cañar), con altitudes de 1200 a 2500 m. (áreas de valle) y 1000 a 2200 m. (estribaciones).

Los climas de estos sectores varían entre lluvias de 300 a 700 mm de precipitación en el ciclo y temperaturas de 16 a 20° C.

Los suelos son Franco, arenosos, con buen drenaje y un pH: 5.5 a 7.5.

Los ciclos de cultivo del fréjol arbustivo en tierno es de 80 a 90 días en valles y estribaciones; y en seco es de 110 a 115 días en valles y estribaciones y 150 a 165 días en Guaranda (Bolívar).

La época de siembra es desde febrero a abril y septiembre a noviembre en Valles y abril a julio en estribaciones (Peralta, et al. 2010).

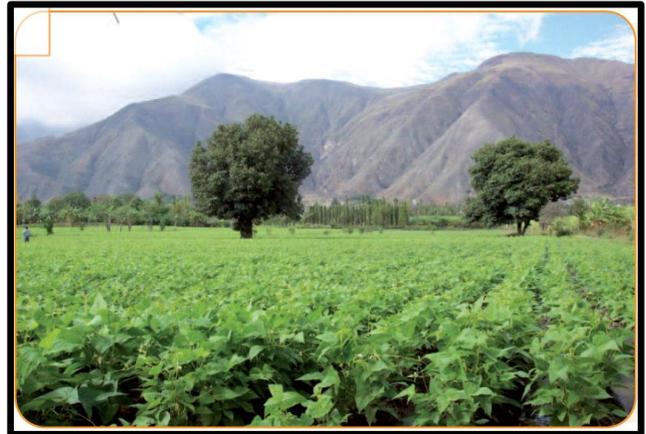


Figura 1 Fréjol arbustivo

Nota. Fuente: Peralta, E., Murillo, A., Mazón, N., Monar, C., Pinzón, J., & Rivera, M. (2010). *Manual agrícola del fréjol y otras leguminosas*. (p. 2). Recuperado de: <http://www.iniap.gob.ec/nsit/e/images/documentos/MANUAL%20FREJOL%20Y%20LEGUMIN%20202010.pdf>

B. *Fréjol Voluble o Trepador*

El nombre científico de esta variedad de fréjol es *Phaseolus vulgaris* L., su centro de origen es en América (Mesoamérica, Zona Andina). En el Ecuador se lo cultiva en las provincias del Carchi, Imbabura, Pichincha, Chimborazo y Bolívar, con altitudes entre 2000 a 3000 metros sobre el nivel del mar.

Los climas de estos sectores varían entre lluvias de 500 a 900 mm de precipitación en el ciclo y temperaturas de 12 a 18° C. Los suelos son Franco y franco arcilloso con buen drenaje y un pH: 5.6 a 5.7.

Los ciclos de cultivo del fréjol voluble variedad INIAP 412 Toa en tierno es de 160 días y en seco es de 180 días, de la variedad INIAP 421 Bolívar en tierno es de 155 y en seco es de 185 días y de la variedad INIAP 426 Canario Siete Colinas en tierno es de 100 días y en seco es de 160 días.

La época de siembra en la Sierra, es de septiembre a enero, dependiendo de la zona y en estribaciones de cordillera es de abril a mayo (Peralta, et al. 2010).



Figura 2. Formas de desarrollo del fréjol voluble o trepador

Nota. Fuente: Peralta, E., Murillo, A., Mazón, N., Monar, C., Pinzón, J., & Rivera, M. (2010). *Manual agrícola del fréjol y otras leguminosas*. (p. 15). Recuperado de: <http://www.iniap.gov.b.ec/nsite/images/documentos/MANUAL%20FREJOL%20Y%20LEGUMIN%202010.pdf>

C. Proceso Agroindustrial del Fréjol

El proceso agroindustrial del fréjol desde la cosecha contempla las siguientes etapas:

- Cosecha: la cosecha en vaina seca debe realizarse cuando las plantas hayan alcanzado la madurez fisiológica, es decir, cuando las hojas de las plantas se hayan caído, las vainas secas estén de color amarillo y con un contenido aproximado de 18 a 20% de humedad en las semillas, esto se puede saber marcando a presión con la uña.

Para arrancar las plantas es necesario verificar que un 90% de todas las plantas hayan cambiado de color.

La trilla, dependiendo de la cantidad, puede hacerse manualmente, por pisoteo con animales o por golpe sobre el piso, usando varas de madera. Para cosechas grandes, se recomienda el uso de trilladoras mecánicas (Peralta, et al. 2010).

- Clasificación de la vaina húmeda y vaina seca: la clasificación de las vainas se lo realiza mediante el tacto y la observación, comúnmente los agricultores lo hacen insertando la uña en la vaina y dependiendo del grado de presión que tuvieron que hacer se la clasifica como vaina húmeda o seca.

Otra manera de hacerlo es mediante el color que presente la vaina, de modo que cuando se la observa de color verde, la vaina está húmeda y cuando se la observa de color amarillo, la vaina está seca.

- Proceso de desvainado del fréjol seco: el proceso de desvainado del fréjol seco empieza tendiendo las vainas secas sobre una superficie plana de forma uniforme y a la intemperie, de modo que la luz solar llegue directamente hacia la vaina para que ésta se deshidrate y así se extraiga el grano por pisoteo con animales o por golpe sobre el piso usando varas de madera, cuando se trate de cantidades pequeñas (1 a 2 ha). El uso de trilladoras mecánicas es recomendado para cosechas grandes.

La práctica tradicional de pisoteo con camión, daña la semilla por aplastamiento y la calidad del grano se reduce significativamente (Peralta, et al. 2010).

- Limpieza y Selección: esta etapa consiste en eliminar los residuos de las vainas que quedaron después del proceso de desvainado, es decir, los restos de grano que se dañaron en dicho proceso y las impurezas del medio. Esto se lo realiza por medio de ventilado natural o usando un ventilador.

El ventilado natural es el tradicional y consiste en levantar hacia el aire de modo sistemático ciertas cantidades del grano utilizando una pala, de modo que el viento se lleve las impurezas y caiga el fréjol limpio.

- Almacenamiento: una vez seleccionado el fréjol de mejor calidad, se procede a almacenarlo en costales para proceder a su comercialización.

El grano para consumo y la semilla se deben almacenar en lugares frescos de 10 a 12°C y secos, con 70% de humedad relativa (cuanto más se aproxima el valor de la humedad relativa al 100% más húmedo está), libre de gorgojo (plagas en los cultivos) y con humedad en el grano inferior al 13% (Peralta, et al. 2010).

- Comercialización: se están realizando pruebas para la industria de enlatado con las variedades de color rojo sólido (ICA Quimbayá, INIAP 402, BRB 194, BRB 195, DRK 105), negros (G21-212, L88-63, A-55, Cóndor, Negro San Luis) y amarillos INIAP 420 Chota e INIAP 480 Rocha).

Para la elaboración de harina se han evaluado seis variedades comerciales y sobresalen por su rendimiento harinero INIAP 480 Rocha (74%), INIAP 481 Rojo del Valle (69%), INIAP Canario del Chota (68%), INIAP 430 Portilla (67%), INIAP 482 Afroandino (66%), INIAP 424 Concepción (65%).

Los granos de color rojo y morado moteado, son usados por los programas de alimentación del Gobierno.

Para los granos de color rojo moteado y morado moteado (con crema), en grano seco, el mercado potencial es Colombia.

Para los granos de color amarillo (canario) en grano seco o tierno el mercado es el nacional.

Para los granos de color blanco de tamaño grande el mercado es el nacional, con énfasis en Semana Santa (abril) en donde se acostumbra comer la conocida fanesca. No hay consumo de los granos de color blanco, en grano seco de tamaño grande.

La variedad INIAP 421 Bolívar, de color rojo entero, ha presentado buenas características y está siendo adoptado por la agroindustria para enlatado (Peralta, et al. 2010).

IV. DESCRIPCION DE LA MAQUINA

A. Descripción de Construcción de la Máquina Desvainadora de Fréjol Seco

Toda la estructura de la máquina es armada con tubo estructural cuadrado Norma ASTM A-500, GRADO A, debido a sus buenas características mecánicas.

La cubierta de la máquina en la zona externa es mediante planchas de acero laminadas al caliente NORMA ASTM A-588M GRADO A, de diferentes espesores dependiendo su aplicación.

En las zonas donde haya contacto directo con el grano, por normas de salubridad, se usa planchas de acero inoxidable NORMA AISI 304, que posee características como resistencia a la corrosión y a los ataques químicos del medio ambiente y es utilizado en las industrias alimenticias.

El sistema que realiza el desvainado del fréjol seco utiliza un eje de acero inoxidable Norma AISI 304, resistente al efecto corrosivo del medio ambiente y es fácil su mecanizado; acoplado a él se encuentran paletas de acero inoxidable AISI 304, las cuales son las que van a golpear al fréjol en vaina para que el grano salga de su cáscara.

Como cojinetes se va a utilizar 2 chumaceras de rodamiento de una hilera de bolas que servirán para sostener al eje en el sistema de desvainado y a la vez a la polea conducida para banda en V que se acopla a éste.

Se utilizará un sensor para apagado automático, el cual estará ubicado estratégicamente en la parte interior de la zona de salida del fréjol desvainado, de manera que cuando la máquina no esté siendo utilizada por el operario, se apague automáticamente después de 10 minutos.

El circuito de control consta de componentes eléctricos y electrónicos, así como un relé, un relé térmico, un contactor, pulsadores, un microprocesador, transistores, resistencias y capacitores, que controlan el correcto funcionamiento del sensor y da la señal para que se apague automáticamente el motor.

Tablero de encendido on/off y parado de emergencia, estará ubicado bajo la zona de carga del producto, por dos razones primordiales, la primera se debe a que está cerca del lugar en donde el operario va a estar la mayor parte del tiempo por si se suscite una emergencia y necesite apagar la máquina y la segunda razón es porque allí no habrá riesgo de que dicho tablero sufra golpes y se dañe.

La capacidad del motor, así como las rpm óptimas en el sistema de desvainado serán seleccionadas cuidadosamente con pruebas de campo y cálculos matemáticos, de manera que el grano salga de la mejor calidad posible y con pérdidas mínimas.

V. CÁLCULOS Y DIMENSIONAMIENTO

A. Cálculo de la estructura de la máquina

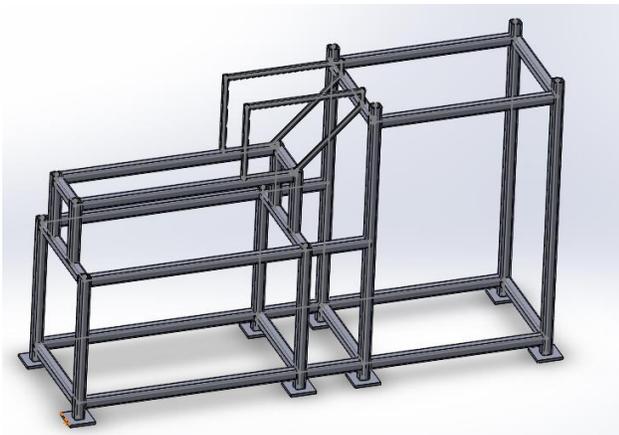


Figura 3. Estructura de la máquina

Nota. Fuente: Autor (Luis Álvarez)

Para el cálculo de la estructura de toda la máquina se ha utilizado el método de pendiente-deflexión, el cual se llama así porque relaciona las pendientes y las deflexiones desconocidas con la carga aplicada sobre la estructura (Hibbeler, 2012).

Ecuación 1. Ecuación del momento del extremo fijo

$$(FEM) = \frac{P * L}{8}$$

Fuente: Hibbeler (2012), contraportada.

Donde:

FEM = momento extremo fijo.

P = peso.

L = longitud de la viga.

Consideramos los tres claros F''F, FB y BB', como los claros están fijamente apoyados en F'' y B', se aplica la ecuación del momento del extremo fijo para FB:

$$(FEM)_{FB} = -\frac{140 * 71}{8} = -1242,5 \text{ Kg.cm}$$

$$(FEM)_{BF} = \frac{140 * 71}{8} = 1242,5 \text{ Kg.cm}$$

Los desplazamientos angulares en F'' y B' serán cero ya que no se producirá un desplazamiento lateral:

$$\theta_{F''} = \theta_{B'} = 0$$

Donde:

θ = desplazamiento angular

Los desplazamientos del ángulo de la cuerda del claro serán cero ya que no se producirá un desplazamiento lateral:

$$\psi_{F''F} = \psi_{FB} = \psi_{BB'} = 0$$

Donde:

ψ = desplazamiento del ángulo de la cuerda del claro

Mediante la siguiente ecuación calculamos el momento interno en el extremo cercano del claro:

Ecuación 2. Ecuación general de pendiente deflexión

$$MN = 2Ek(2\theta_N + \theta_F - 3\psi) + (FEM)N$$

Fuente: Hibbeler (2012)

Donde:

MN = momento interno en el extremo cercano del claro.

E, k = módulo de elasticidad del material y rigidez del claro.

θ_N, θ_F = pendientes de los extremos cercano y lejano o desplazamientos angulares del claro en los soportes; los ángulos se miden en radianes y son positivos en sentido horario.

ψ = rotación de la cuerda del claro debida a un desplazamiento lineal; éste ángulo se mide en radianes y es positivo en sentido horario.

(FEM)N = momento del extremo fijo en el soporte del extremo cercano.

A continuación aplicamos la Ecuación 2 para los claros F''F, FB y BB':

Ecuación 3. Ecuación del momento interno en el extremo cercano del claro F''F

$$MF''F = 2E \left(\frac{I}{105} \right) (2(0) + \theta F - 3(0)) + 0 = 0,019EI\theta F$$

Ecuación 4. Momento interno en el extremo cercano del claro FF''

$$MFF'' = 2E \left(\frac{I}{105} \right) (2(\theta B) + 0 - 3(0)) + 0 = 0,038EI\theta B$$

Ecuación 5. Momento interno en el extremo cercano del claro FB

$$MFB = 2E \left(\frac{I}{71} \right) (2(\theta F) + \theta B - 3(0)) - 1242,5 = 0,05EI\theta F + 0,027EI\theta B - 1242,5$$

Ecuación 6. Momento interno en el extremo cercano del claro BF

$$MBF = 2E \left(\frac{I}{71} \right) (2(\theta B) + \theta F - 3(0)) + 1242,5 = 0,05EI\theta B + 0,027EI\theta F + 1242,5$$

Ecuación 7. Momento interno en el extremo cercano del claro BB'

$$MBB' = 2E \left(\frac{I}{105} \right) (2(\theta B) + 0 - 3(0)) + 0 = 0,038EI\theta B$$

Ecuación 8. Momento interno en el extremo cercano del claro B'B

$$MB'B = 2E \left(\frac{I}{105} \right) (2(0) + \theta B - 3(0)) + 0 = 0,019EI\theta B$$

Las seis ecuaciones de la 3 a la 8 contienen ocho incógnitas. Las dos ecuaciones de equilibrio restantes provienen del equilibrio de momentos en las juntas F y B:

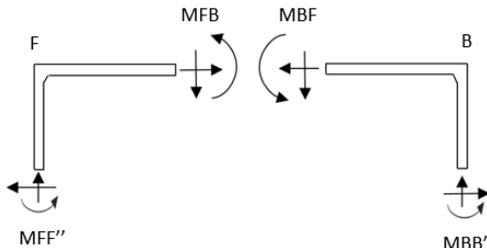


Figura 4. Equilibrio de momentos en las juntas I y K

Nota. Fuente: Autor (Luis Álvarez)

Ecuación 9. Ecuación de equilibrio en la junta F

$$MFF'' + MFB = 0$$

Ecuación 10. Ecuación de equilibrio en la junta B

$$MBF + MBB' = 0$$

Para resolver estas ocho ecuaciones se sustituyen la Ecuación 4 y la Ecuación 5 en la Ecuación 9 y tenemos:

Ecuación 11. Ecuación despejada de la ecuación de equilibrio en la junta F

$$0,088EI\theta F + 0,027EI\theta B = 1242,5$$

Y se reemplazan la Ecuación 6 y la Ecuación 7 en la Ecuación 10:

Ecuación 12. Ecuación despejada de la ecuación de equilibrio en la junta B

$$0,088EI\theta B + 0,027EI\theta F = -1242,5$$

Al sustituir la Ecuación 11 en la Ecuación 12 y resolver, se obtiene:

Ecuación 13. Ecuación despejada de las ecuaciones de equilibrio de las juntas I y K

$$\theta F = -\theta B = \frac{21132,41}{EI}$$

Sustituyendo la Ecuación 13 en las ecuaciones de la 3 a 8 se tiene:

$$MFF'' = 394,08 \text{ Kg. cm}$$

$$MFF'' = 788,16 \text{ Kg. cm}$$

$$MFB = -766,64 \text{ Kg. cm}$$

$$MBF = 766,64 \text{ Kg. cm}$$

$$MBB' = -788,16 \text{ Kg. cm}$$

$$MB'B = -394,08 \text{ Kg. cm}$$

En base a estos resultados se realiza el diagram de cortes y momentos.

Una vez obtenidos los resultados del máximo momento de flexión que va a soportar la viga, se procede a calcular ancho H y espesor e del tubo estructural cuadrado:

Material: Tubo estructural cuadrado ASTM A-500 Grado A

$$S_y = 2741,97 \text{ Kg/cm}^2$$

Donde:

S_y = Resistencia a la fluencia

$$\sigma d = 2109,21 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

Donde:

σd = Esfuerzo de diseño recomendado para un acero estructural

Fuente: Mott, R.,L.,(2006).

Ecuación 14. Ecuación del módulo de sección requerido 1

$$S = \frac{M}{\sigma d}$$

Fuente: Mott, R.,L.,(2006).

Donde:

S = Módulo de sección requerido

M = Momento

Reemplazando los valores correspondientes, tenemos:

$$S = \frac{1718}{2109,21} = 0,81 \text{ cm}^3$$

A continuación podemos utilizar otra ecuación del módulo de sección requerido:

Ecuación 15. Ecuación del módulo de sección requerido 2

$$S = \frac{I}{c}$$

Fuente: Mott, R.,L.,(2006).

Donde:

I = Momento de inercia del área transversal.

c = distancia del eje neutro a la fibra más alejada, en la sección transversal de la viga.

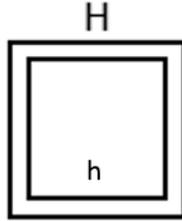


Figura 5. Perfil cuadrado hueco

Nota. Fuente: Autor (Luis Álvarez)

Ecuación 16. Ecuación del momento de inercia de un perfil cuadrado hueco

$$I = \frac{1}{12}(H^4 - h^4)$$

Donde:

I = momento de inercia.

H = ancho externo del perfil.

h = ancho interno del perfil

Ecuación 17. Ecuación de la distancia del eje neutro a la fibra más alejada

$$c = \frac{H}{2}$$

Reemplazando la Ecuación 16 y la Ecuación 17 en la Ecuación 15 tenemos:

Ecuación 18. Ecuación despejada de la ecuación del módulo de sección requerido 2

$$S = \frac{\frac{1}{12}(H^4 - h^4)}{\frac{H}{2}}$$

Reemplazando el resultado de la Ecuación 14 en la Ecuación 18 y resolviendo, tenemos:

Ecuación 19. Ecuación despejada de la ecuación del módulo de sección requerido 1

$$h^4 = H^4 - 0,407H$$

Asumimos un $H = 4,0$ cm., y reemplazándolo en la ecuación 19, podemos calcular $h = 3,99$ cm y $e = 0,01$ cm.

Se selecciona en el catálogo un tubo estructural cuadrado de ancho $H = 4$ cm y de espesor $e = 0,15$ cm.

B. Análisis estático de la estructura mediante SolidWorks

Mediante este software podemos realizar un análisis de la estructura de la máquina, de manera que podamos identificar el comportamiento de las vigas mediante la colocación de las cargas a las que van a estar sometidas en la vida real.



Figura 6. Desplazamiento estático de la estructura de la máquina

Nota. Fuente: SolidWorks

En la Figura 6 se observa que el desplazamiento máximo que podría ocurrir en la estructura de la máquina es de 0,1638 mm y el desplazamiento mínimo es 0, ya que estos valores son casi nulos, se concluye que el diseño se lo ha realizado correctamente, es seguro y soporta las cargas sin presentar problemas.

C. Análisis del factor de seguridad por el criterio de tensiones de Von Mises

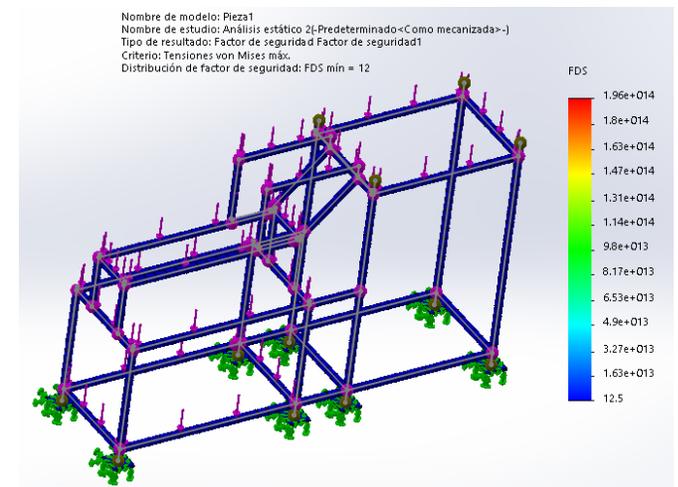


Figura 7. Tensiones de Von Mises

Nota. Fuente: SolidWorks

D. Cálculo de la potencia y rpm óptimas del motor

Mediante pruebas de campo se selecciona las rpm óptimas y la potencia del motor:

Ecuación 20. Torque

$$T = F * d$$

Donde:

T = torque máximo que debe vencer el motor.

F = fuerza necesaria.

d = distancia desde el eje hasta donde se aplica la fuerza F .

$$H = \frac{(103.94 \text{ lb. in.})(850 \text{ rpm})}{63025}$$

$$H = 1,4 \text{ hp}$$

A este resultado lo multiplicamos por un factor de corrección de 1,6 por pérdidas en las bandas, apoyos del eje en las chumaceras, atascamiento del sistema de desvainado por pesos imprevistos y de esta manera la potencia final del motor queda de la siguiente manera:

$$H = 1,4 \text{ hp} * 1,6$$

$$H = 2,24 \text{ hp}$$

Se selecciona un motor de 2 hp con las siguientes características:

Tabla 1. Características del motor seleccionado

Marca	Weg
Modelo	LR 38324
HP(KW)	2(1,5)
V	110/220
A	27.60/13.80
HZ	60
RPM	1720
PH	1

Nota. Fuente: Autor (Luis Álvarez)

E. Cálculo del eje y del sistema de transmisión

Para empezar el diseño, seleccionamos el material:

Material: eje de acero inoxidable AISI 304

Propiedades mecánicas:

$$S_y = 35 \text{ ksi}$$

Fuente: (Mott, R., L.,(2006). p. A-12.

Donde:

S_y = resistencia a la fluencia.

$$S_u = 85 \text{ ksi}$$

Fuente: (Mott, R., L.,(2006). p. A-12.

Donde:

S_u = resistencia a la tensión.

$$S_n = 25 \text{ ksi}$$

Donde:

S_n = resistencia a la fatiga.

Para encontrar el factor por tamaño, asumimos un diámetro $D = 100 \text{ mm}$.

Ecuación 21. Factores de tamaño

$$C_s = 0,859 - 0,000837D$$

Donde:

C_s = factor por tamaño.

Reemplazando los datos correspondientes tenemos:

$$C_s = 0,859 - 0,000837 * (100)$$

$$C_s = 0,7753$$

$$\text{Factor de confiabilidad} = 0,99$$

$$CR = 0,81$$

Donde:

CR = confiabilidad deseada.

A continuación calculamos la resistencia real a la fatiga, reemplazando los valores correspondientes encontrados anteriormente en la siguiente ecuación:

Ecuación 22. Ecuación de la resistencia a la fatiga modificada

$$S'_n = S_n * C_s * CR$$

Fuente: Mott,R.,L.,(2006)

Donde:

S'_n = resistencia real a la fatiga.

C_s = factor por tamaño.

CR = confiabilidad deseada.

Reemplazando los datos correspondientes tenemos:

$$S'_n = (25\text{ksi})(0,770)(0,81)$$

$$S'_n = 15,592 \text{ ksi} = 15\,592 \text{ psi}$$

Seleccionamos un factor de diseño:

$$N = 2$$

Donde:

N = factor de diseño.

Se ha seleccionado un factor de diseño $N = 2$, ya que los elementos de la máquina están bajo cargas dinámicas con una confianza promedio en todos los datos de diseño (Mott, R.,L.,185).

Ecuación 23. Ecuación del par torsional sobre la polea impulsada

$$T = 63000(P)/n$$

Fuente: Mott,R.,L.,2006

Donde:

T = par torsional, [lb.pulg].

P = potencia, [hp].

n = velocidad de giro, [rpm].

$$T = 63000(2)/850$$

$$T = 148,24 \text{ lb. pulg.}$$

Realizamos el diagrama de fuerzas sobre la polea impulsada para banda en V, para calcular la fuerza flexionante que ejerce la polea sobre el eje:

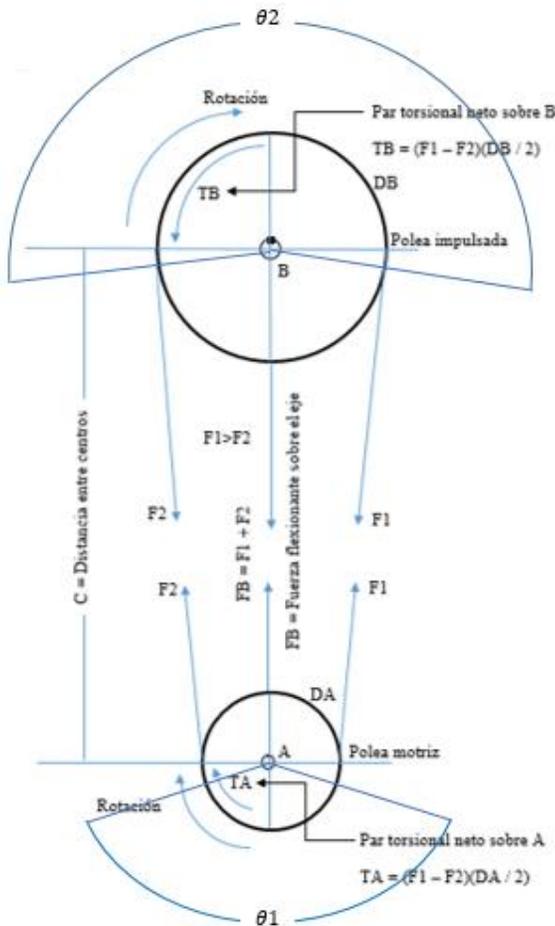


Figura 8. Diagrama de fuerzas en las poleas motriz e impulsada

Nota. Fuente: Adaptado de Mott, R., L. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. Cuarta Edición (p. 539). México: Pearson Educación.

Ecuación 24. Ecuación de la relación de fuerzas

$$\frac{F_1}{F_2} = 5$$

Fuente: Mott, R., L., (2006)

Ecuación 25. Ecuación del par torsional neto sobre B

$$T_B = (F_1 - F_2) \left(\frac{D_B}{2} \right)$$

Fuente: Mott, p. 539

Ecuación 26. Ecuación despejada del par torsional neto sobre B

$$F_2 = \frac{T_B}{2 * D_B}$$

Ahora necesitamos encontrar el valor del diámetro de la polea mayor \$D_B\$:

Datos:

Potencia transmitida = 2 hp.

Velocidad del motor = \$W_1 = 1720\$ rpm.

Velocidad de salida = \$W_2 = 850\$ rpm.

Calculamos la relación de velocidades nominales:

$$Relación = \frac{1720}{850} = 2,02$$

Asumimos un diámetro estándar de la polea motriz que satisfaga los lineamientos del diseño de transmisiones por bandas en V:

Tamaño estándar de la polea motriz, \$D_A = 2,5\$ pulg = 6,35 cm.

Ecuación 27. Ecuación del intervalo de distancias nominales entre centros

$$D_2 < C < 3(D_2 + D_1)$$

Fuente: Mott, R., L., (2006)

Donde:

\$C\$ = distancia entre centros

\$D_1 = D_A\$ = diámetro de la polea motriz.

\$D_2 = D_B\$ = diámetro de la polea impulsada.

El ángulo de contacto en la polea menor debe ser mayor que \$120^\circ\$:

$$\theta_1 > 120^\circ$$

Ecuación 28. Ecuación del ángulo de contacto de la banda en la polea de diámetro menor

$$\theta_1 = 180^\circ - 2 \sin^{-1} \left(\frac{D_2 - D_1}{2C} \right)$$

Fuente: Mott, R., L., (2006)

Para calcular el diámetro de la polea impulsada, \$D_B\$ utilizamos la siguiente ecuación:

Ecuación 29. Ecuación de la relación de velocidades angulares:

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{D_2}{D_1}$$

Donde:

\$W_1\$ = velocidad del motor

\$W_2\$ = velocidad de salida

Fuente: Ecuación 7-2, p. 270 Mott

Despejamos \$D_2\$ y reemplazamos los valores correspondientes:

$$D_2 = \frac{D_1 * W_1}{W_2}$$

$$D_2 = \frac{2,5 * 1720}{850}$$

\$D_2 = 5,058\$ pulg = 12,85 cm. Se selecciona un diámetro estándar de \$5 \text{ in} = 12,7\$ cm.

$$D_2 = 5 \text{ in}$$

\$C\$ (distancia entre centros aproximado) = 53 cm.

Comprobamos si cumplimos con los lineamientos de diseño para las bandas en V:

$$D_2 < C < 3(D_2 + D_1)$$

$$15,05 < 39 < 3(15,05 + 7,87)$$

$$15,05 < 39 < 68,76$$

$$\theta_1 > 120^\circ$$

$$\theta_1 = 180^\circ - 2 \sin^{-1} \left(\frac{D_2 - D_1}{2C} \right)$$

$$\theta_1 = 180^\circ - 2 \sin^{-1} \left(\frac{12,7 - 6,35}{2 * 53} \right)$$

$$\theta_1 = 173,13^\circ$$

Los datos que hemos encontrado, cumplen con los lineamientos de diseño y podemos continuar con el análisis de la fuerza flexionante que ejerce la polea sobre el eje.

$$F_2 = \frac{148,24 \text{ lb. pulg}}{2 * 5 \text{ pulg}}$$

$$F_2 = 14,824 \text{ lb}$$

$$F_1 = 5F_2$$

$$F_1 = 74,12 \text{ lb}$$

Con las reacciones obtenidas procedemos a realizar el diagrama de cortes y momentos.

Continuamos con el diseño mediante el cálculo del diámetro mínimo aceptable del eje, en varios puntos del mismo. En cada punto observamos la magnitud del par torsional y del momento flexionante que existan allí:

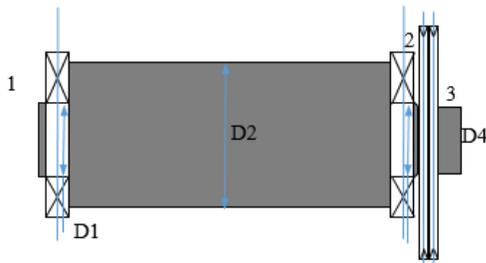


Figura 9. Diagrama de los diferentes diámetros del eje

Nota. Fuente: Autor (Luis Álvarez)

En el punto 1: el punto 1 es el asiento de un rodamiento, allí no hay momentos torsionales ni flexionantes, sin embargo sí hay una fuerza cortante vertical, igual a la reacción en el rodamiento.

Utilizamos la siguiente ecuación para calcular el diámetro que requiere el eje en este punto:

Ecuación 30. Ecuación del diámetro requerido del eje

$$D = \sqrt{\frac{2,94Kt(V)N}{S'n}}$$

Fuente: Ecuación 12-16 Mott, p.545

Donde:

D = diámetro del eje requerido.

Kt = chaflán (chaflán agudo = 2,5).

V = fuerza cortante vertical.

N = factor de seguridad. (N = 2)

S'n = resistencia real a la fatiga.

$$D_1 = \sqrt{\frac{2,94 * 2,5(13,836 \text{ lb})(2)}{15\,592 \text{ psi}}}$$

$$D_1 = 0,01 \text{ pulg}$$

Este diámetro es muy pequeño, en comparación con los demás diámetros que se van a calcular, así que debemos seleccionar un diámetro adecuado de acuerdo al tamaño de un rodamiento razonable.

2: el punto 2 es el lugar de un rodamiento y tiene un chaflán agudo a la izquierda y a la derecha.

El diámetro D2 a la izquierda de 2, se especificará después de haber terminado el análisis de esfuerzos y seleccionando el rodamiento en 2.

Para calcular el diámetro D3 en 2, utilizamos la siguiente ecuación:

Ecuación 31. Ecuación de diseño para ejes

$$D = \left[\frac{32N}{\pi} \sqrt{\left[\frac{KtM}{S'n} \right]^2 + \frac{3}{4} \left[\frac{T}{Sy} \right]^2} \right]^{1/3}$$

Fuente: Ecuación 12-24, Mott, p.548

Donde:

D = diámetro del eje.

N = factor de seguridad.

Kt = chaflán (chaflán agudo = 2,5).

M = momento flexionante.

S'n = resistencia real a la fatiga.

T = momento torsional.

Sy = resistencia a la fluencia.

$$D_3 = \left[\frac{32(2)}{\pi} \sqrt{\left[\frac{(2,5)(489,17 \text{ lb. pulg})}{15\,592 \text{ psi}} \right]^2 + \frac{3}{4} \left[\frac{148,24 \text{ lb. pulg}}{35\,000 \text{ psi}} \right]^2} \right]^{1/3}$$

$$D_3 = 1,16 \text{ pulg}$$

El punto 3 es el lugar de la polea en donde no existe momento pero si existe fuerza cortante:

$$D_4 = \sqrt{\frac{2,94Kt(V)N}{S'n}}$$

$$D_4 = \sqrt{\frac{2,94(2,5)(102,78)(2)}{15\,592 \text{ psi}}}$$

$$D_4 = 0,3 \text{ pulg}$$

Seleccionamos los diámetros nominales de los rodamientos estándares:

D1 = 1 pulg

D2 = 1,25 pulg

D3 = 1 pulg

D4 = 0,9 pulg

F. Diseño de la polea motriz y polea conducida

Calculamos la potencia de diseño, para un motor eléctrico de par torsional normal que trabaje más de 15 horas por día, el factor de servicio es 1,5; entonces:

$$\text{Potencia de diseño} = 2 \text{ hp} * 1,5$$

$$\text{Potencia de diseño} = 3 \text{ hp}$$

Se recomienda una banda 3VX para 3 hp a 1750 rpm en la entrada.

Calculamos la longitud de la banda necesaria L, mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 31. Ecuación de la longitud de paso

$$L = 2C + 1,57(D2 + D1) + \frac{(D2 - D1)^2}{4C}$$

Fuente: Mott,R.,L.,(2006)

Donde:

C = distancia entre centros

D1 = diámetro de la polea motriz

D2 = diámetro de la polea impulsada

$$L = 2(53) + 1,57(12,7 + 6,35) + \frac{(12,7 - 6,35)^2}{4(53)}$$

$$L = 136,09 \text{ cm} = 53,58 \text{ pulg.}$$

Se selecciona una longitud de banda estándar 3V, L = 48 pulg.

Calculamos la distancia entre centros correcta, mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 32. Ecuación de la distancia entre centros

$$C = \frac{B + \sqrt{B^2 - 32(D2 - D1)^2}}{16}$$

Donde:

$$B = 4L - 6,28(D2 + D1)$$

Fuente: Mott,R.,L.,(2006)

Para lo cual calculamos primero el valor de B, reemplazando sus valores correspondientes:

$$B = 4L - 6,28(D2 + D1)$$

$$B = 4(48) - 6,28(12,7 + 6,35)$$

$$B = 424,726 \text{ cm}$$

Con el valor de B obtenido, reemplazamos los datos en la Ecuación y encontramos en valor de la distancia entre centros C correcta:

$$C = \frac{424,726 + \sqrt{424,726^2 - 32(12,7 - 6,35)^2}}{16}$$

$$C = 52,9 \text{ cm} = 20,86 \text{ pulg}$$

Calculamos el valor correcto del ángulo de contacto de la banda en la polea de diámetro menor

$$\theta_1 = 180^\circ - 2 \sin^{-1}\left(\frac{D2 - D1}{2C}\right)$$

$$\theta_1 = 180^\circ - 2 \sin^{-1}\left(\frac{12,7 - 6,35}{2 * 52,9}\right)$$

$$\theta_1 = 173,12^\circ$$

Calculamos la potencia nominal

Para una polea de 2,5 pulgadas a 1720 rpm, la potencia nominal real es de 1,75 hp.

Determinamos los factores de corrección

Para $\theta_1 = 173,12^\circ$

Factor de corrección por ángulo de contacto, $C\theta = 0,97$.

Para L = 48 pulg:

Factor de corrección por longitud, $CL = 0,92$.

Calculamos la potencia nominal corregida por banda y la cantidad de bandas necesarias para manejar la potencia de diseño:

$$\text{Potencia corregida} = C\theta * CL * P$$

$$\text{Potencia corregida} = 0,98 * 0,92 * 1,75$$

$$\text{Potencia corregida} = 1,5778 \text{ hp.}$$

$$\text{Número de bandas} = \frac{\text{Potencia de diseño}}{\text{Potencia corregida}}$$

$$\text{Número de bandas} = \frac{3}{1,5778}$$

$$\text{Número de bandas} = 1,90 \text{ bandas}$$

De acuerdo a los datos arrojados seleccionamos un número de 2 bandas para nuestro sistema de transmisión.

G. Sistema de Control

El sistema de control consta de un Microcontrolador ATMEGA 8, un sensor de objetos SASSIN, pulsadores, luces piloto, contactor y relé térmico.

Diagrama de bloques de las instrucciones programadas:



Figura 10. Diagrama de bloques

Nota. Fuente: Autor (Luis Álvarez)

Diagrama eléctrico de conexiones:

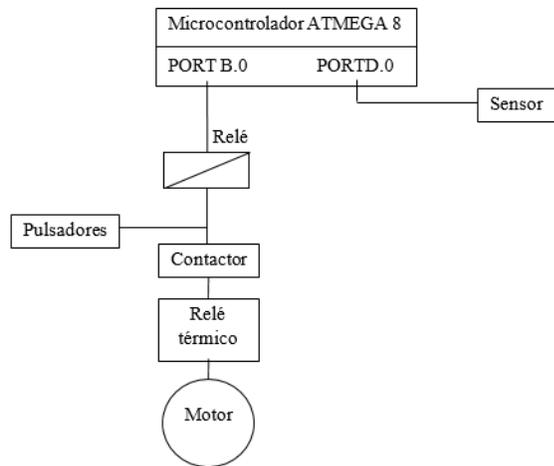


Figura 11 Diagrama eléctrico

Nota. Fuente: Autor (Luis Álvarez)

agricultores de la parroquia de Ambuquí en la provincia de Imbabura. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

Hibbeler, R. C. (2012). *Análisis Estructural*. México: Pearson Educación.

Mott, R. L. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. México: Pearson Educación.

Richard G. Budynas y J. Keith Nisbett. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Octava edición. (p. iii).

VIII. BIOGRAFÍA



Luis Hernán Álvarez Játiva nacido en El Sagrario, Ibarra, provincia de Imbabura, el 21 de Junio de 1990. Egresado de la Carrera de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Técnica del Norte de la ciudad de Ibarra.

VI. RECONOCIMIENTOS

Al Ing. Carlos Villarreal por su guía técnica y profesional para realizar un exitoso proyecto y su entrega para cumplir las metas propuestas.

A la Sra. Mery Páez por ser una valiosa persona, trabajadora y servicial que ha estado contribuyendo notablemente al bien estar de los estudiantes de la Universidad Técnica del Norte.

A mi familia, mis padres Hernán y Mery quienes incondicionalmente han aportado valores ejemplares a mi vida personal y han sido sustento de amor. Y muy por especial a mi abuelita Beatriz quién fue una segunda madre para mí.

Y a todos mis colegas universitarios con quienes he podido compartir conocimientos y buenos momentos.

VII. REFERENCIAS

Peralta, E., Barrera, V., Unda, J., Guala, M., Tacán M., & Batallas, M. A. (2001). *Estudio de la producción, poscosecha, mercadeo y consumo de fréjol arbustivo en el Valle del Chota, Ecuador*. Recuperado del sitio de internet de Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias: http://www.iniap.gob.ec/nsite/images/documentos/ESTUDIO_PRODUCCIÓN_POSCOSECHA_MERCADEO_CONSUMO_FREJOL_ARBUSTIVO_VALLE_CHOTA_ECUADOR.pdf

Peralta, E., Murillo, A., Mazón, N., Monar, C., Pinzón, J., & Rivera, M. (2010). *Manual Agrícola de Fréjol y otras Leguminosas. Cultivos, variedades y costos de producción* (Publicación Miscelánea No. 135). Recuperado del sitio de internet de Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias: <http://www.iniap.gob.ec/nsite/images/documentos/MANUAL%20FREJOL%20Y%20LEGUMIN%202010.pdf>

Aguilar, D., & Haro, D. (2010). *Diseño y construcción de una máquina desvainadora de fréjol para los pequeños*