



1859



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables

Carrera de Ingeniería Electromecánica

Diseño y construcción de un prototipo clasificador densimétrico de café

Trabajo de Titulación previo a
la obtención del título de
Ingeniero Electromecánico

AUTOR:

Juan Diego Enríquez Rogel

DIRECTOR:

Ing. Byron Agustín Solórzano Castillo, Mg. Sc.

Loja - Ecuador

2023

Certificación

Loja, 16 de marzo de 2023

Ing. Byron Agustín Solórzano Castillo, Mg. Sc.
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Diseño y construcción de un prototipo clasificador densimétrico de café**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Electromecánico**, de la autoría del señor **Juan Diego Enríquez Rogel** con **cédula de identidad Nro. 1105375339**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.

Ing. Byron Agustín Solórzano Castillo, Mg. Sc.
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, **Juan Diego Enríquez Rogel**, declaro ser el autor del presente Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mi Trabajo de Titulación en el Repositorio Institucional – Biblioteca Virtual.



Firma:

Cédula de identidad: 1105375339

Fecha: 20 de septiembre del 2023

Correo electrónico: juan.enriquez@unl.edu.ec

Teléfono: 0960630743

Carta de autorización por parte del autor, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Titulación.

Yo, **Juan Diego Enríquez Rogel** declaro ser autor del Trabajo de Titulación denominado: **Diseño y construcción de un prototipo clasificador densimétrico de café**, como requisito para optar por el título de **Ingeniero Electromecánico**; autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los veinte días del mes de septiembre del dos mil veintitrés.



Firma:

Autor: Juan Diego Enríquez Rogel

Cédula de identidad: 1105375339

Dirección: La Argelia

Correo electrónico: juan.enriquez@unl.edu.ec / juan06diego@gmail.com

Teléfono: 0960630743

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director del Trabajo de Titulación: Ing. Byron Agustín Solorzano Castillo Mg. Sc.

Dedicatoria

El desarrollo del presente trabajo lo dedico a mis padres: Gerardo y Rosa, quienes gracias a su esfuerzo, motivación y apoyo incondicional han sabido prepararme ante las adversidades de la vida, a ellos de corazón expreso mi eterna gratitud y honra.

Juan Diego Enríquez Rogel

Agradecimiento

Agradezco a Dios por acompañarme, ampararme y permitirme día a día hacer camino al andar.

A mis padres Gerardo y Rosa quienes son protagonistas principales de mis logros y virtudes, a mis hermanos: Cristhian, Rosa y Yessenia, a mis tíos Dalton y Jacqueline, familia y amigos por el apoyo digno y desinteresado que me han brindado.

A mis docentes de la carrera de Ingeniería Electromecánica por haberme impartido los conocimientos necesarios para mi formación académica y profesional.

Al Ing. Byron Solórzano, quien como mentor y amigo me ha extendido su conocimiento, tiempo, apoyo, motivación y paciencia para lograr el presente objetivo.

Juan Diego Enríquez Rogel

Índice de contenidos

Portada	i
Certificación	ii
Autoría	iii
Carta de autorización	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice de contenidos	vii
Índice de tablas:	xi
Índice de figuras:	xii
Índice de anexos:	xv
Simbología:	xvi
1. Título	1
2. Resumen	2
2.1. Abstract	3
3. Introducción	4
4. Marco teórico	6
4.1. Capítulo 1: Métodos de clasificación de granos de café.....	6
4.1.1. Clasificación por densidad	6
4.1.1.1. Sistemas de clasificación por densidad.	6
4.1.1.1.1. Máquina densimétrica tipo mesa.	6
4.1.1.1.2. Máquina densimétrica tipo circular.....	7
4.1.1.1.3. Máquina densimétrica tipo columna.	7
4.1.2. Funcionamiento de mesas clasificadoras densimétricas	8
4.1.3. Calibración de mesas densimétricas.....	9
4.2. Capítulo 2: Factores que inciden en la clasificación del café por densidad.....	10
4.2.1. Densidad.....	10

4.2.2. Tamaño.....	10
4.2.3. Humedad	10
4.2.4. Granos de café defectuosos	10
4.3. Capítulo 3: Componentes de una máquina clasificadora densimétrica	11
4.3.1. Tolva	11
4.3.2. Mesa vibrante	11
4.3.3. Sistema de inclinación de la mesa vibrante.....	11
4.3.4. Soplante.....	11
4.3.5. Salidas del producto clasificado.....	11
4.4. Capítulo 4: Fundamentos de dinámica.....	12
4.4.1. Cinemática.....	12
4.4.1.1. Movimiento curvilíneo de partículas.	12
4.4.1.1.1. Aceleración de la componente tangencial.	12
4.4.1.1.2. Aceleración de la componente normal.	13
4.4.2. Cinética	13
4.4.2.1. Segunda ley de movimiento de Newton.....	13
4.4.2.2. Ecuaciones de movimiento.	14
4.4.2.3. Equilibrio dinámico.....	14
4.5. Capítulo 5: Fundamentos de diseño mecánico.....	16
4.5.1. Resistencia de materiales	16
4.5.1.1. Esfuerzos normales.	16
4.5.1.2. Esfuerzo cortante.....	16
4.5.1.3. Esfuerzo a la flexión.....	17
4.5.1.3.1. Momento rectangular de inercia en una sección rectangular.	17
4.5.1.3.2. Flexión de una viga en voladizo con carga en extremo.	18
4.5.1.4. Esfuerzo de pandeo.	19
4.5.1.5. Esfuerzos combinados.....	20

4.5.1.5.1. Elemento sometido a esfuerzo normal y esfuerzo flexión.	21
4.5.1.6. Esfuerzos fluctuantes.	21
4.5.1.6.1. Esfuerzo sinusoidal completamente invertido.	21
4.5.2. Factor de seguridad	23
4.5.3. Factor de servicio	24
4.5.4. Transmisión de potencia	24
4.5.4.1. Potencia nominal.	24
4.5.4.2. Potencia de diseño.	26
4.5.5. Volante de inercia	26
4.5.6. Rodamientos.....	27
4.5.7. Pernos	28
4.5.7.1. Esfuerzo cortante transversal en el perno.....	28
4.5.7.2. Esfuerzo de tensión en el perno.	29
4.5.8. Mecanismo biela manivela corredera.....	29
4.6. Capítulo 6: Fundamentos de instalaciones eléctricas.....	34
4.6.3. Características de componentes eléctricos	34
5. Metodología	35
6. Resultados.....	38
6.1. Recopilación de información previa a la clasificación por densidad.....	38
6.2. Selección de máquina clasificadora densimétrica para prototipado	38
6.3. Definición de componentes principales y sistemas de la máquina	39
6.4. Diseño conceptual del prototipo de prueba.....	40
6.5. Fase de experimentación para la definición de los parámetros de operación del prototipo	43
6.6. Diseño de prototipo final	52
6.6.1. Sistema de transmisión de Potencia	52
6.6.2. Sistema de generación de aire	75

6.6.3. Sistema de movimiento alternante	76
6.6.4 Sistema de alimentación y descarga.....	83
6.6.5. Sistema de mesa y bastidor	84
6.6.6. Sistema eléctrico	85
6.6.6.1. Circuito de control.....	86
6.6.6.2. Circuito de fuerza	87
6.8. Pruebas operacionales.....	87
6.9. Diseño de detalle.....	89
6.10. Análisis de costos del prototipo final.....	92
6.11. Instrucciones de operación, cuidado y mantenimiento del prototipo.	92
7. Discusión	93
8. Conclusiones	96
9. Recomendaciones	97
10. Bibliografía	98
11. Anexos	102

Índice de tablas:

Tabla 1. Ajuste de mesa gravimétrica para la buena práctica de manufactura.	9
Tabla 2. Tipos de máquinas clasificadoras densimétricas.	38
Tabla 3. Ángulos de las inclinaciones de la mesa según las alturas A y B.	44
Tabla 4. Resultados de pruebas operacionales.	88
Tabla 5. Componentes de mayor importancia del prototipo.	90
Tabla 6. Costos de construcción de la máquina.	92

Índice de figuras:

Figura 1. Máquina densimétrica tipo mesa.	6
Figura 2. Máquina densimétrica tipo circular.	7
Figura 3. Máquina densimétrica tipo columna.	7
Figura 4. Movimiento de las semillas mediante la acción del vaivén a), Acción del flujo de aire que actúa sobre las semillas b).	8
Figura 5. Mesa clasificadora densimétrica.	8
Figura 6. Apoyos oscilantes de una mesa densimétrica.	9
Figura 7. Tolva.	11
Figura 8. Movimiento circulando de una partícula respecto a su centro.	12
Figura 9. Relación proporcional de la segunda ley de Newton.	13
Figura 10. Fuerzas que actúan sobre un cuerpo.	14
Figura 11. Sistema de vectores equivalente a cero.	15
Figura 12. Vector de inercia mediante sus componentes tangencial y normal.	15
Figura 13. Sólido sometido a tracción (a) y sólido sometido a compresión (b).	16
Figura 14. Sólido sometido al corte.	16
Figura 15. Sólido sometido a flexión.	17
Figura 16. Flexión en una viga en voladizo con carga en extremo.	18
Figura 17. Esfuerzo sinusoidal completamente invertido.	21
Figura 18. Mecanismo de biela- manivela- corredera.	30
Figura 19. Ejemplo de diagrama de velocidades.	31
Figura 20. Representación gráfica de las aceleraciones.	32
Figura 21. Gráfica de los centros de masa de cada elemento según su aceleración.	33
Figura 22. Diagrama de flujo de la metodología a seguir en el presente trabajo de tesis.	37
Figura 23. Principio de excentricidad.	39
Figura 24. Bosquejo de caja de la mesa.	40
Figura 25. Bosquejo de tolva.	41

Figura 26. Bosquejo de paletas móviles.	41
Figura 27. Bosquejo de soportes.	42
Figura 28. Bosquejo de bastidor.	42
Figura 29. Bosquejo de eje excéntrico.	43
Figura 30. Bosquejo de biela.	43
Figura 31. Proceso de búsqueda de condiciones operacionales del prototipo.	46
Figura 32. Inicio de la fase de experimentación.	47
Figura 33. Búsqueda de clasificación aumentando la frecuencia f	47
Figura 34. Búsqueda de la clasificación variando la posición Q_i y la excentricidad S	48
Figura 35. Búsqueda de clasificación variando respectivamente las inclinaciones B y A	49
Figura 36. Replanteamiento de modelo experimental al no haber clasificado.	49
Figura 37. Variación de los parámetros B y f para buscar una mejor precisión operacional.	50
Figura 38. Puesta en marcha del prototipo con sus variaciones posibles alrededor de B y f	50
Figura 39. Almacenamiento de datos de operación según los muestreos.	51
Figura 40. Sistema de transmisión de potencia.	52
Figura 41. Esquema de periodo del movimiento del prototipo.	53
Figura 42. Masa total que actúa en la mesa.	55
Figura 43. Esquema de la geometría del volante de inercia.	57
Figura 44. Posición de los elementos en movimiento.	59
Figura 45. Dimensiones de los elementos en movimiento.	59
Figura 46. Diagrama de velocidad.	60
Figura 47. Diagrama de aceleraciones.	62
Figura 48. Diagrama de aceleraciones en los centros de masa.	64
Figura 49. Distribución de fuerzas del sistema biela-manivela-corredera.	66
Figura 50. Teorema de Zhukovski en el sistema biela-manivela-corredera.	66
Figura 51. Sujeción y regulación de la biela.	69
Figura 52. Esfuerzos en la sujeción y regulación de la biela.	69

Figura 53. Esfuerzo cortante en la rosca del perno.....	70
Figura 54. Esfuerzo de tensión del perno.	71
Figura 55. Interacción de la fuerza requería en el perno de sujeción de la biela.....	72
Figura 56. Perno de sujeción de la biela sometido al corte.....	72
Figura 57. Sistema de generación de aire.	76
Figura 58. Sistema de movimiento alternante.	76
Figura 59. Geometría de soportes móviles.	77
Figura 60. Soporte sin flexión (a) y soporte con flexión (b).....	77
Figura 61. Sistema de alimentación del prototipo (tolva).....	83
Figura 62. Sistema de descarga del prototipo (paletas móviles).....	84
Figura 63. Sistema de mesa oscilante.	84
Figura 64. Bastidor detallado.....	85
Figura 65. Mecanismos de inclinación del bastidor.	85
Figura 66. Diagrama del circuito de control.	86
Figura 67. Diagrama de circuito de fuerza.	87
Figura 68. Peso del muestro en la salida de granos livianos.....	88
Figura 69. Peso del muestro en la salida de granos medios.....	89
Figura 70. Peso del muestro en la salida de granos pesados.....	89

Índice de anexos:

Anexo 1. Propiedades geométricas.....	102
Anexo 2. Condiciones de los extremos de columnas	104
Anexo 3. Factores para la modificación del límite de resistencia a la fatiga.....	105
Anexo 4. Factor de seguridad por medio del método de Pugsley	107
Anexo 5. Factor se servicio	108
Anexo 6. Propiedades geométricas de sólidos.....	109
Anexo 7. Rodamientos FAG.....	110
Anexo 8. Consideraciones de pernos.....	111
Anexo 9. Dimensiones para agujeros en cribas para clasificación de café	113
Anexo 10. Proceso de construcción de cribas	114
Anexo 11. Matriz de selección, para definir el tipo de máquina densimétrica.....	117
Anexo 12. Proceso de construcción del prototipo experimental	119
Anexo 13. Parámetros de operación de la máquina densimétrica	126
Anexo 14. Detalles del acero de transmisión AISI 1018.....	127
Anexo 15. Detalles del acero inoxidable AISI 304	128
Anexo 16. Motor trifásico y variador de frecuencia.....	129
Anexo 17. Sistema de generación de aire.....	131
Anexo 18. Costos de materiales, partes y piezas para su construcción	135
Anexo 19. Planos.....	139
Anexo 20. Certificación de la traducción del resumen.....	141

Simbología:

a_t : Aceleración tangencial en [m/s²].

v : Velocidad en [m/s].

t : Tiempo en [s].

a_n : Aceleración normal en [m/s²].

r : Radio de la curvatura en [m].

F : Fuerza en [N].

m : Masa en [kg].

a : Aceleración en [m/s²].

P : Peso en [N].

g : Aceleración gravitatoria en [m/s²].

ΣF : Sumatoria de fuerzas en [N].

σ_{nor} : Esfuerzo normal en [MPa].

A : Sección transversal en [m²].

τ : Esfuerzo cortante / Esfuerzo cortante de un perno en [MPa].

B : Sección paralela a fuerza en [m²].

σ_{max} : Esfuerzo máximo a la flexión en [MPa].

M : Momento o Torque en [lb in] o [Nm].

c : Distancia máxima del eje neutro hasta el punto donde actúa la fuerza en [m].

I : Momento rectangular de inercia en [m⁴].

b : Base del elemento en [m].

h : Altura del elemento en [m].

s : Desplazamiento de la flexión en [m].

l : Longitud [m].

E : Coeficiente de elasticidad en $[\text{N}/\text{m}^2]$.

R_{esb} : Relación de esbeltez.

k : Radio mínimo de giro en $[\text{m}]$.

R_{esb_lim} : Relación de esbeltez límite de proporcionalidad.

C : Constante de condiciones de extremos de columnas.

σ_y : Resistencia a la fluencia del material en $[\text{N}/\text{m}^2]$.

σ_{pan} : Esfuerzo de pandeo en $[\text{MPa}]$.

P_{cr} : Fuerza crítica de la columna en $[\text{N}]$.

S_e : Límite de resistencia crítica a la fatiga en $[\text{MPa}]$.

σ_a : Esfuerzo alternante en $[\text{MPa}]$.

k_a : Factor de modificación por la configuración superficial.

k_b : Factor de modificación por el tamaño.

k_c : Factor de modificación por la carga.

k_d : Factor de modificación por la temperatura.

k_e : Factor de confiabilidad.

k_f : Factor de modificación por efectos varios.

S'_e : Límite de resistencia a la fatiga en viga rotativa en $[\text{MPa}]$.

a : Factor de acabado superficial.

S_{ut} : Resistencia a la tensión en $[\text{MPa}]$.

b : Exponente de acabado superficial.

n_s : Factor de seguridad.

σ_{adm} : Esfuerzo admisible del material en $[\text{MPa}]$.

σ_{dis} : Esfuerzo de diseño en $[\text{MPa}]$.

n_{sx} : Factor de seguridad que comprende de las características A, B y C.

n_{sy} : Factor de seguridad que comprende de las características D y E.

Pot_{nom} : Potencia nominal en [W].

Ec : Energía cinética en [Nm] o [J]

ω : Velocidad angular en [rad/s].

n : Revoluciones por minuto en [rpm] o [min^{-1}].

f : Frecuencia en [Hz] o [1/s].

T : Periodo en [s].

Pot_{dis} : Potencia de diseño en [W].

Pot_{req} : Potencia requerida para el movimiento en [W].

I_{ne} : Inercia que requiere el volante en [kg m^2].

m_{vol} : Masa del volante de inercia en [kg].

R : Radio del volante de inercia en [m].

V_{vol} : Volumen del volante de inercia en [m^3].

ρ_{vol} : Densidad del volante de inercia en [kg/m^3].

e_{vol} : Espesor del volante de inercia en [m].

L_{10} : Vida nominal (con un 90% de fiabilidad) en [10^6 revoluciones].

C : Capacidad de carga dinámica en [kN].

P : Carga dinámica equivalente en [kN].

p : Exponente de vida para rodamientos.

L_{h10} : Vida nominal en [h].

X : Factor radial.

F_r : Carga radial en [kN].

Y : Factor axial.

F_a : Carga axial.

F_i : Precarga en [lb] o [N].

d_r : Diámetro menor del perno en [in] o [m].

n_t : Número de roscas en contacto.

p : Paso del perno en [in] o [m].

F_p : Carga de prueba en [lb] o [N].

A_t : Área de esfuerzo de tensión en [in²] o [m²].

S_p : Resistencia de prueba mínima en [kpsi] o [MPa].

σ_b : Esfuerzo de tensión en el perno en [MPa] o [kpsi].

k_{vel} : Coeficiente de velocidad en [m/s/mm].

k_{ace} : Coeficiente de aceleración en [m/s²/mm].

ξ : Aceleración angular en [s⁻²].

1. Título

Diseño y construcción de un prototipo clasificador densimétrico de café

2. Resumen

Esta investigación describe el diseño y construcción de un prototipo clasificador densimétrico de café como alternativa dirigida a los micro productores para clasificar los granos según su densidad (800 kg/m^3), sean ligeros (792 kg/m^3), intermedios (811 kg/m^3) o pesados (825 kg/m^3). Primeramente, se efectuó la búsqueda y recopilación de información bibliográfica acerca de las máquinas actualmente existentes, reconociendo su función y componentes mecánicos. Después, se realizó el reconocimiento de piezas y sistemas de funcionamiento de las máquinas, lo que permitió direccionar la propuesta general del diseño hacia la construcción del prototipo requerido. Para este diseño se consideró una matriz de ponderación, con el fin de definir el tipo de máquina apropiada para cumplir con los objetivos, además de examinar y sintetizar los sistemas y componentes importantes para la clasificación de los granos de café. Seguidamente, se propuso un modelo de prototipo experimental con base en máquinas análogas similares, fijando valores constantes en cuanto a dimensiones y distribución de agujeros y bandas lineales para proyectar la forma y distribución del diseño deseado. Se ejecutan pruebas de ensayo-error hasta determinar la medida adecuada de las inclinaciones a lo largo y ancho de la mesa, flujo de aire necesario, velocidad angular y amplitud de oscilaciones requeridas para el funcionamiento idóneo del prototipo. El prototipo final tuvo como referencia las dimensiones y estructura del modelo experimental, al cual se le aplicó los fundamentos de diseño mecánico para mejorarlo técnicamente. Para el funcionamiento del prototipo se emplearon componentes eléctricos que permitieron el accionamiento en secuencia para la puesta en marcha del soplante y el variador de frecuencia que comanda al motor. Durante la validación se utilizó una muestra de 4,8 kg de granos de café con igual medida de humedad, tamaño y variedad (caturre); se obtuvieron los mismos resultados de clasificación densimétrica, tanto en el modelo experimental como en el prototipo final.

Palabras claves: clasificación densimétrica, café, clasificación de granos, clasificación de café.

2.1. Abstract

This research describes the design and construction of a coffee densimetric classifier prototype as an alternative aimed at micro-producers. The purpose of the prototype is to classify beans according to their density (800 kg/m^3), whether they are light (792 kg/m^3), intermediate (811 kg/m^3), or heavy (825 kg/m^3). First, a search and compilation of bibliographic information about currently existing machines was conducted to understand their function and mechanical components. Then, the recognition of parts and operating systems of the machines was carried out, which helped direct the general design proposal for the construction of the required prototype. The design process involved creating a weighting matrix to determine the appropriate type of machine to meet the objectives. The important systems and components for the classification of coffee beans were examined and synthesized. Next, an experimental prototype model was proposed based on similar analog machines. Constant values for dimensions and distribution of holes and linear bands were set to project the desired design. Trial-error tests were conducted to determine the appropriate measurement of inclinations, necessary air flow, angular speed, and amplitude of oscillations required for the ideal functioning of the prototype. The final prototype was developed based on the dimensions and structure of the experimental model, with additional improvements applied through the fundamentals of mechanical design. Electrical components were used for the operation of the prototype, allowing for the activation in sequence of the blower and the frequency inverter that commands the motor. For validation purposes, a sample of 4.8 kg of coffee beans with the same measure of humidity, size, and variety (Caturra) was used. Similar densimetric classification results were obtained in both the experimental model and the final prototype.

Keywords: *densimetric classification, coffee, grain classification, coffee classification.*

3. Introducción

El café es una bebida antigua y tradicional con una gran importancia en la economía de los países debido a que es uno de los productos más valiosos de consumo a nivel mundial. Tiene una importancia crucial en la economía ya sea por exportación o importación del producto, pues su comercialización se da en los principales mercados de materias primas; además, su cultivo, procesamiento, transporte y comercialización genera millones de empleos para todas las personas alrededor del mundo (Ministerio de Agricultura y Ganadería, s.f.).

Esta “cultura cafetera” va tomando fuerza en su consumo, por lo tanto, es importante que cada día se vayan creando diversos métodos encaminados a ofrecer el mejor café (EL UNIVERSO, 2021). Es por esto que existe la necesidad de realizar procesos cada vez más especializados en la clasificación del café, ya sea por color, densidad e incluso por tamaño con el fin de mejorar la calidad del mismo y por ende generar mejores expectativas en los consumidores. En el caso de los micro productores y comerciantes, ellos no cuentan con la tecnología suficiente para los procesos de clasificación especializados, de manera que se les dificulta ofrecer un producto más tecnificado, en cambio las grandes empresas cafeteras sí los implementan.

Entre los métodos de clasificación asociados a la calidad del café se pueden citar a la clasificación por tamaño, color y densidad (entre los tipos de máquinas densimétricas existentes se nombra las siguientes: (ZACCARIA, s.f.), (Indiamart, 2022) y (Solocafé, 2023)). La clasificación densimétrica es un proceso que muchas veces es pasado por alto, sea por falta de maquinaria o por desconocimiento de la misma, esto llegaría a influir en el resultado del producto final pues el sabor del café puede llegar a ser de mala calidad por la mezcla de granos buenos y malos al momento del tueste. Por lo antes mencionado, esta investigación se enfoca en la creación de un prototipo clasificador densimétrico de café de bajo costo y accesible a los micro productores y comerciantes, ya que este método necesita una mayor atención pues generalmente de esto depende el obtener un producto de calidad.

El presente documento de investigación se enfoca en el diseño y construcción de un prototipo clasificador densimétrico de café con la finalidad de lograr la construcción de un equipo de bajo costo, que beneficie a los micro productores y que resuelva la problemática de clasificación del café, direccionando el procedimiento hacia los resultados del producto final, es decir, en la calidad del sabor del café en taza.

Por lo tanto, este trabajo está enfocado en el tema de investigación titulado “Diseño y construcción de un prototipo clasificador densimétrico de café”, el mismo que está enmarcado dentro del objetivo general de “Diseñar y construir un prototipo clasificador densimétrico de café”, cuyos objetivos específicos son:

- Definir el sistema de clasificación densimétrica y sus condiciones de operación.
- Diseñar un prototipo de máquina densimétrica de laboratorio.
- Construir y validar la máquina densimétrica.

Para la construcción de la máquina se restringió el tamaño, variedad y humedad del grano de café, recurriendo también a varias pruebas experimentales donde se variaron los grados de libertad en la inclinación a lo largo y ancho de la mesa, cambio en el flujo de aire, velocidad y amplitud de oscilación, todo esto con el fin de conseguir los parámetros de funcionamiento de la máquina.

4. Marco teórico

4.1. Capítulo 1: Métodos de clasificación de granos de café

La clasificación de granos de café se realiza cuando el grano está verde, es decir, cuando aún no ha sido tostado.

4.1.1. Clasificación por densidad

La clasificación por densidad permite la separación de los granos de café livianos, intermedios y pesados, indistintamente de si tienen un mismo tamaño o volumen, ya que prevalece su densidad, además permite alejar las partículas o trozos de café partidos que han sido pasados por alto en una clasificación por tamaño. Este método de clasificación influye en la calidad del café en taza, ya que, al ser retirados los granos de café ligeros, malformados, fragmentados, entre otros; permite un proceso de tueste parejo y homogéneo.

4.1.1.1. Sistemas de clasificación por densidad.

En los sistemas de clasificación por densidad se pueden encontrar muchas variedades en el mercado, de acuerdo al tipo de máquina que se ajuste a las necesidades operativas.

4.1.1.1.1. Máquina densimétrica tipo mesa.

Este tipo de máquina se encuentra diseñada específicamente para la clasificación de granos según su peso específico, se conforma principalmente por una mesa vibratoria inclinada, por donde fluye aire perpendicular a la misma, Figura 1. La vibración, ángulos de inclinación de la mesa y el flujo de aire son regulables.



Figura 1. Máquina densimétrica tipo mesa.
Fuente: (ZACCARIA, s.f.).

4.1.1.1.2. Máquina densimétrica tipo circular.

Este tipo de máquina clasifica por medio de una vibración circular, con ayuda de un eje excéntrico en su base; por lo general se encuentra acoplada a un sistema desgranador o removedor de cáscara, Figura 2.



Figura 2. Máquina densimétrica tipo circular.
Fuente: (Indiamart, 2022).

4.1.1.1.3. Máquina densimétrica tipo columna.

Este tipo de máquina permite la clasificación y limpieza de todo tipo de cereales por medio de un ventilador y niveles de salida a lo alto de la misma, Figura 3.



Figura 3. Máquina densimétrica tipo columna.
Fuente: (Solocafé, 2023).

4.1.2. Funcionamiento de mesas clasificadoras densimétricas

Citando el trabajo de tesis titulado “Estudio y diseño de una clasificadora gravimétrica de maní (*arachis hypogaea*) como estrategia de implementación en pequeñas industrias” (Meza y Sornoza, 2017) manifiestan que la superficie por donde se mueven los granos es forzada a oscilar en un plano transversal por donde interactúa un flujo de aire, obligando que los granos más ligeros leviten por encima de los más pesados (Figura 4.a), así como la inclinación de dicha superficie de clasificación para el direccionamiento de separación de lo ligero y pesado (Figura 4.b).

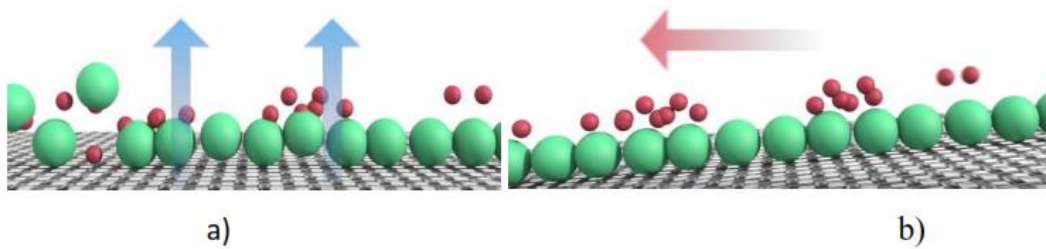


Figura 4. Movimiento de las semillas mediante la acción del vaivén a), Acción del flujo de aire que actúa sobre las semillas b).

Fuente: (Meza y Sornoza, 2017).

Una de las partes más importantes de esta máquina es la mesa, la cual tiene orificios y bandas lineales en toda la superficie por donde se mueven los granos de café. La mesa es inclinable y por medio de un soplador, el aire fluye a través de los orificios en sentido perpendicular a la misma, permitiendo que los granos de café ligeros se posicionen por encima de los pesados. La Figura 5 muestra una mesa de un modelo clasificador densimétrico por donde se mueven los granos de café.



Figura 5. Mesa clasificadora densimétrica.

Fuente: (HnosARCEltda, 2013).

Este tipo de máquinas se encuentran sostenidas por columnas flexibles las cuales sirven de apoyo y permiten el movimiento alternante que otorga el eje excéntrico (Figura 6).



Figura 6. Apoyos oscilantes de una mesa densimétrica.
Fuente: (Máquina Electro Perú, 2017).

La entrada y salida de los granos de café transcurre en la tolva y las paletas móviles, respectivamente, donde la tolva permite el almacenamiento y caída gradual del grano, mientras que las paletas móviles ayudan a direccionarlos según las proporciones deseadas.

4.1.3. Calibración de mesas densimétricas

El manual de buenas prácticas de manufactura en beneficio UNDECAF S.A (Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica, 2010) manifiesta que en la mezcla de partículas con diferentes tamaños y peso específico no pueden estratificarse y separarse de forma apropiada, pero las partículas del mismo tamaño y con diferente peso específico si pueden separarse de manera eficaz. Por ello muestra una Tabla 1 correspondiente al ajuste de la mesa gravimétrica.

Tabla 1. Ajuste de mesa gravimétrica para la buena práctica de manufactura.

Ajuste de la mesa gravitatoria		
Variables	Variación	Efecto
Carga de café.	Alta carga.	Disminuye la eficiencia.
Presión y velocidad del aire.	Aumento de la presión (y velocidad).	Retrasa el avance de los granos pesados.
Inclinación lateral.	Mayor inclinación.	Menor espesor de la capa de café que se dirige hacia la boca de pesados.
Inclinación longitudinal.	Mayor inclinación.	mayor cantidad de producto en las bocas de liviano y menor en las de pesado
Velocidad de la excéntrica o carrera del impulsor.	Aumento de la velocidad.	Este aumento significa aceleración de la ascensión de granos pesado hacia la boca de pesados.
Graduación de las bocas de salida.	Diferente posición	Aumenta o disminuye la cantidad de café que sale de una boca específica.

Fuente: (Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica, 2010).

4.2. Capítulo 2: Factores que inciden en la clasificación del café por densidad

4.2.1. Densidad

La densidad de los granos de café depende principalmente de la altura en la que encuentran sembrados, ya que a más altura las cerezas del café maduran durante más tiempo debido a que en altitudes las temperaturas son más frescas en todo el año alrededor de 18 y 21°C (mayor densidad del grano de café), y fuera de ese rango de temperatura las cerezas maduran en menos tiempo (menos densidad del grano de café). Según su variedad, el grano puede ser más o menos denso, sin embargo, es muy común que la cereza del grano de café que se encuentra más cerca del tronco es más densa que la cereza que se encuentra al final de la rama (PERFECT DAILY GRIND, 2021).

4.2.2. Tamaño

El tamaño de los granos de café radica en su variedad, no obstante, una misma variedad puede dar diversos tamaños dependiendo de factores como la calidad nutricional del cultivo. (La Joya del Café, 2021)

4.2.3. Humedad

La humedad juega un papel importante en la conservación de los granos de café, si existe humedad por encima del 98% de actividad de agua se genera un entorno ideal para el crecimiento de microorganismos, en cambio, con humedad moderada (por debajo del 70% de actividad de agua) hay estabilidad a causa del deterioro físico, químico y biológico. El porcentaje de humedad más bajo al que se puede almacenar los granos de café sin deterioro es del 12%, por ende, los porcentajes de humedad en los granos de café denotan un peso diferente. (Cortés, 2021)

4.2.4. Granos de café defectuosos

Los granos defectuosos provocan sabores extraños y no deseados, sus defectos son notorios físicamente mostrando variedades en su tamaño, forma, color y peso. Los defectos del grano de café se clasifican en primarios y secundarios; los primarios se caracterizan por ser granos de café negros, avinagrados, cereza seca, granos dañados por hongo y afectados severamente por insectos como la broca, así como también por la presencia de palos o piedras, por otro lado; los secundarios son aquellos granos que tienen rasgos distintivos entre los que se encuentran la presencia de cáscara, son negros parciales, avinagrados parciales, flotadores, inmaduros, partidos, arrugados y deformes en forma de concha. (Primero Café, s.f.)

4.3. Capítulo 3: Componentes de una máquina clasificadora densimétrica

4.3.1. Tolva

La tolva es un contenedor resistente y ligero de gran utilidad, que permite el paso regulable de los granos mediante una compuerta en la parte inferior de la misma. Esta herramienta se encuentra suspendida por encima de la máquina densimétrica y con ayuda de la gravedad y su compuerta de salida de material, se puede realizar las dosificaciones, Figura 4.



Figura 7. Tolva.
Fuente: (Cimbria, s.f.).

4.3.2. Mesa vibrante

Es un componente que se encarga de hacer que los granos de café circulen a lo largo de la misma por medio de oscilaciones consecutivas, tomando su rumbo según la inclinación que tenga la mesa, además permite que los granos menos densos se separen de los más densos con ayuda de un flujo de aire que es atravesado por los agujeros de dicha mesa.

4.3.3. Sistema de inclinación de la mesa vibrante

Este sistema consiste en el direccionamiento de los granos de café por medio de un ajuste en la posición de la mesa vibrante, misma que puede ser inclinada a lo largo y ancho según la rapidez de circulación del grano que se requiera.

4.3.4. Soplante

Este componente tiene como misión hacer que fluya aire entre los agujeros de la mesa vibrante, con el fin de lograr que los granos menos densos se posicionen por encima de los más densos.

4.3.5. Salidas del producto clasificado

Es el último recorrido que toman los granos de café según su densidad, y estas salidas son las que los redirigen los granos de café por medio de unas paletas movibles, la cuales permiten obtener la ubicación proporcional requerida.

4.4. Capítulo 4: Fundamentos de dinámica

4.4.1. Cinemática

Se utiliza para correlacionar el desplazamiento, la velocidad, la aceleración y el tiempo sin referirse a la causa del movimiento.

4.4.1.1. Movimiento curvilíneo de partículas.

Se presenta cuando la trayectoria del movimiento es en forma circular con respecto a un centro, donde la aceleración se descompone en aceleración tangencial y aceleración normal. La partícula P se mueve alrededor del centro C, donde su componente de aceleración normal apunta hacia el centro del giro, mientras que su componente de aceleración tangencial apunta en dirección tangencial a la circunferencia que se forma. La aceleración normal y tangencial son perpendiculares entre sí (Figura 5).

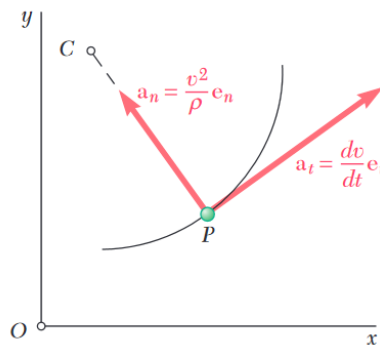


Figura 8. Movimiento circulando de una partícula respecto a su centro.
Fuente: (BEER et al., 2010).

4.4.1.1.1. Aceleración de la componente tangencial.

Es la tasa de cambio de la velocidad que ocurre en un movimiento curvilíneo; cuando un cuerpo parte del reposo requiere un tiempo para alcanzar una velocidad requerida, dicha velocidad se divide para el tiempo que se necesitó para con ello tener el resultado de la aceleración tangencial (ecuación 1)

$$a_t = \frac{v}{t} \quad (1)$$

Donde:

a_t : Aceleración tangencial en [m/s²].

v : Velocidad en [m/s].

t : Tiempo en [s].

4.4.1.1.2. Aceleración de la componente normal.

Es la aceleración que siempre apunta al centro de la curvatura y su magnitud se muestra en la ecuación 2. La componente de aceleración normal es fácil de calcular cuando se conoce la velocidad y el radio.

$$a_n = \frac{v^2}{r} \quad (2)$$

Donde:

a_n : Aceleración normal en [m/s²].

v : Velocidad en [m/s].

r : Radio de la curvatura en [m].

4.4.2. Cinética

Se utiliza para predecir el movimiento causado por una fuerza dada o para determinar la fuerza requerida para producir un movimiento específico.

4.4.2.1. Segunda ley de movimiento de Newton.

Hace mención al movimiento que se produce por manifiesto de una fuerza resultante, mismas que se conoce como el producto de la masa por la aceleración (Figura 9). Este principio fundamental establece que la aceleración que se experimenta es proporcional a la fuerza que recibe (ecuación 3)

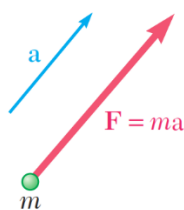


Figura 9. Relación proporcional de la segunda ley de Newton.
Fuente: (BEER et al., 2010).

$$F = ma \quad (3)$$

Donde:

F : Fuerza en [N].

m : Masa en [kg].

a : Aceleración en [m/s²].

La fuerza F también puede ser vista a manera de peso P cuando la masa del cuerpo se encuentra sometida a la aceleración gravitatoria g equivalente a $9,81 \text{ m/s}^2$ (ecuación 4).

$$P = mg \quad (4)$$

Donde:

P : Peso en [N].

m : Masa en [kg].

g : Aceleración gravitatoria en [m/s^2].

4.4.2.2. Ecuaciones de movimiento.

Un cuerpo de masa m que experimenta varias fuerzas puede expresarse tal como lo muestra la Figura 10, y su ecuación equivalente hace referencia a la sumatoria de las fuerzas (ecuación 5).

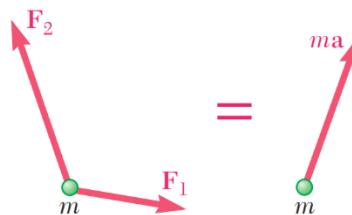


Figura 10. Fuerzas que actúan sobre un cuerpo.
Fuente: (BEER et al., 2010).

$$\Sigma F = ma \quad (5)$$

Donde:

ΣF : Sumatoria de fuerzas en [N].

4.4.2.3. Equilibrio dinámico.

Transponiendo la ecuación 5 en términos que se iguale a cero dicha ecuación, se tiene la segunda ley de Newton en forma alternativa (ecuación 6).

$$\Sigma F - ma = 0 \quad (6)$$

Al sumar $-ma$ con las fuerzas que actúan sobre ese cuerpo, se obtiene un sistema de vectores equivalente a cero. El vector $-ma$ de magnitud ma con dirección opuesta es correspondiente a una fuerza de inercia que permite que haya un equilibrio dinámico y se denomina vector de inercia, ver Figura 11.

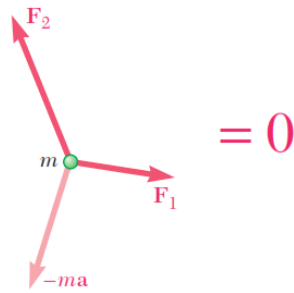


Figura 11. Sistema de vectores equivalente a cero.
Fuente: (BEER et al., 2010).

De igual forma se puede utilizar la ecuación 6 para interpretar la fuerza de inercia en las dos componentes tangencial ($-ma_t$) y normal ($-ma_n$), (Figura 12).

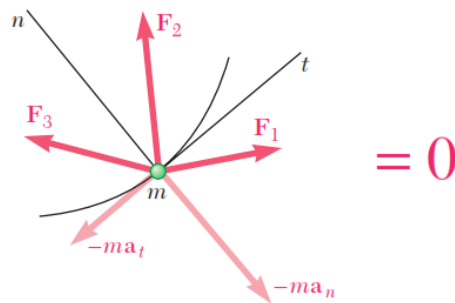


Figura 12. Vector de inercia mediante sus componentes tangencial y normal.
Fuente: (BEER et al., 2010).

Hay que tener en cuenta que cualquiera de estas dos componentes puede ser cero en casos especiales:

- 1) Si el cuerpo parte del reposo con velocidad inicial cero, la componente normal del vector de inercia es cero en $t = 0$.
- 2) Si el cuerpo se mueve a una velocidad uniforme a lo largo de su trayectoria, la componente tangencial del vector de inercia es cero, y solo se debe considerar su componente normal (BEER et al., 2010).

4.5. Capítulo 5: Fundamentos de diseño mecánico

4.5.1. Resistencia de materiales

Se establecen según la disposición de las fuerzas que interactúan en un sólido, mismo que puede estar sometido a esfuerzos del tipo: normal, cortante, flexión y pandeo.

4.5.1.1. Esfuerzos normales.

Estos pueden ser a tracción o compresión, es decir, un sólido que presenta una fuerza que tiende a halar se denomina tracción (Figura 13.a), si la fuerza tiende a aplastar se denomina compresión (Figura 13.b), se aplica la ecuación 7.

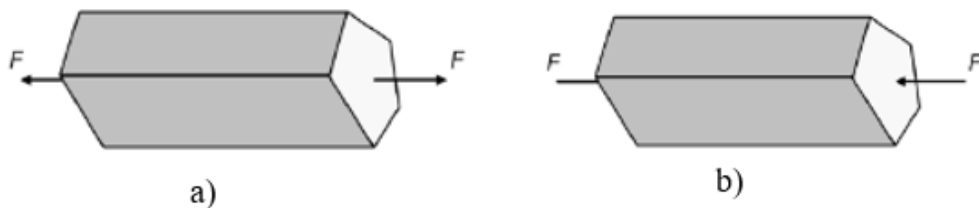


Figura 13. Sólido sometido a tracción (a) y sólido sometido a compresión (b).

Fuente: (Silva Cueva, 2015).

$$\sigma_{nor} = \pm \frac{F}{A} \quad (7)$$

Donde:

σ_{nor} : Esfuerzo normal en [MPa]. (Es positivo cuando está a tracción y negativo cuando está a compresión)

F : Fuerza que actúa sobre el sólido en [N].

A : Sección transversal en [m²].

4.5.1.2. Esfuerzo cortante.

Ocurre cuando un sólido se encuentra sometido a fuerzas paralelas al plano que las resiste, mismas que tienden a separar las porciones que hay a cada lado provocando un corte (Figura 14), ecuación 8.



Figura 14. Sólido sometido al corte.

Fuente: (Silva Cueva, 2015).

$$\tau = \frac{F}{B} \quad (8)$$

Donde:

τ : Esfuerzo cortante en [MPa].

F : Fuerza que actúa sobre el sólido en [N].

B : Sección paralela a fuerza en [m²].

4.5.1.3. Esfuerzo a la flexión.

Se presenta cuando la fuerza actúa en sentido perpendicular al eje de un sólido provocando que se doble a lo largo de su eje neutro (eje centroidal), ver Figura 15, concurrentemente una parte del sólido se tracciona y la otra se comprime, lo cual se describe mediante la ecuación 9.

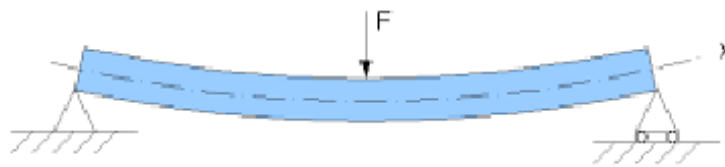


Figura 15. Sólido sometido a flexión.
Fuente: (Silva Cueva, 2015).

$$\sigma_{max} = \frac{M * c}{I} \quad (9)$$

Donde:

σ_{max} : Esfuerzo máximo a la flexión en [MPa].

M : Momento flector en [Nm].

c : Distancia máxima del eje neutro hasta el punto donde actúa la fuerza en [m].

I : Momento rectangular de inercia en [m⁴] (El Anexo 1 muestra los momentos de inercia rectangulares de algunas secciones).

4.5.1.3.1. Momento rectangular de inercia en una sesión rectangular.

Es el producto de un doceavo de la base por la altura elevada al cubo. Ecuación 10.

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (10)$$

Donde:

b : Base del elemento en [m].

h : Altura del elemento en [m].

4.5.1.3.2. Flexión de una viga en voladizo con carga en extremo.

Ocurre en una viga que se encuentra empotrada en un extremo y en el otro se aplica una fuerza en dirección perpendicular a lo largo de la viga, donde la reacción en el empotramiento R_1 es igual a la fuerza F aplicada en el otro extremo y el momento M_1 es igual a fuerza por la distancia l de la viga, tal como se muestra en la Figura 16. La flexión es expresada en la ecuación 11 (*nota*: la ecuación es negativa debido a la convención de signos de la flexión).

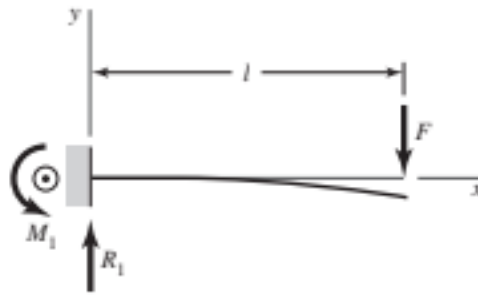


Figura 16. Flexión en una viga en voladizo con carga en extremo.
Fuente: (Budynas y Nisbett, 2012).

$$EIs = -\frac{Fl^3}{3} \quad (11)$$

Donde:

s : Desplazamiento de la flexión en [m].

F : Fuerza aplicada en [N].

l : Longitud de la viga en [m].

E : Coeficiente de elasticidad en [N/m²].

I : Momento rectangular de inercia en [m⁴].

Otro caso basado en la Figura 16 ocurre una vez determinada la flexión dada por la distancia y , y aplicada la misma fuerza F en dirección contraria para que la viga vuelva a su punto de partida; adicional se aplica una carga P en compresión de la viga, entonces se tendría la siguiente ecuación 12.

$$EIs = \frac{Fl^3}{3} - \frac{Psl^2}{2} \quad (12)$$

Donde:

P : Carga aplicada en [N].

4.5.1.4. Esfuerzo de pandeo.

Se presenta en un elemento sometido a una compresión que provoca una inestabilidad en dicho cuerpo debido a las propiedades elásticas del material. Tanto columnas como vigas son los elementos que suelen fallar por pandeo debido a que son esbeltas con respecto a su longitud.

La relación de esbeltez es el cociente de la longitud dividido por el radio mínimo de giro. Consiste en la ecuación 13.

$$R_{esb} = \frac{l}{k} \quad (13)$$

Donde:

R_{esb} : Relación de esbeltez.

l : Longitud de la columna en [m].

k : Radio mínimo de giro en [m].

El radio mínimo de giro k se da según la sección transversal del elemento (ver Anexo 1) y su ecuación simplificada se expresa en la ecuación 14.

$$k = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (14)$$

Donde:

k : Radio mínimo de giro en [m].

I : Momento rectangular de inercia en [m⁴].

A : Sección transversal en [m²].

Existen dos métodos de análisis para columnas rectas con carga central: mediante la fórmula de Euler (para columnas largas y esbeltas), y mediante la fórmula de J. B. Johnson (para columnas cortas).

Para la elección del método apropiado, se compara la relación de esbeltez límite de proporcionalidad de la columna expresado en la ecuación 15 con la relación de esbeltez (R_{esb}) del elemento a analizar.

$$R_{esb_lim} = \sqrt{\frac{2\pi^2 CE}{\sigma_y}} \quad (15)$$

Donde:

R_{esb_lim} : Relación de esbeltez límite de proporcionalidad.

C : Constante de condiciones de extremos de columnas (ver Anexo 2).

E : Coeficiente de elasticidad en $[N/m^2]$.

σ_y : Resistencia a la fluencia del material en $[N/m^2]$.

Cuando la $R_{esb} > R_{esb_lim}$, se utiliza la fórmula de Euler (ecuación 16) y cuando la $R_{esb} < R_{esb_lim}$, se utiliza la fórmula de J. B. Johnson (ecuación 17):

$$\sigma_{pan} = \frac{P_{cr}}{A} = \frac{C\pi^2 E}{\left(\frac{l}{\bar{k}}\right)^2} \quad (16)$$

$$\sigma_{pan} = \frac{P_{cr}}{A} = \sigma_y \left[1 - \frac{\sigma_y l^2}{4\pi^2 k^2 CE} \right] \quad (17)$$

Donde:

σ_{pan} : Esfuerzo de pandeo en $[MPa]$.

P_{cr} : Fuerza crítica de la columna en $[N]$.

I : Momento rectangular de inercia en $[m^4]$.

l : Longitud de la columna en $[m]$.

4.5.1.5. Esfuerzos combinados.

El esfuerzo combinado representa la suma o combinación de varios esfuerzos aplicados a un componente, ya sea carga normal, esfuerzo de flexión o esfuerzo de torsión.

4.5.1.5.1. Elemento sometido a esfuerzo normal y esfuerzo flexión.

Un elemento sometido a un esfuerzo combinado ante carga normal y carga de flexión se representa (sumando la ecuación 7 y 9) en la ecuación 18.

$$\sigma_{com} = \frac{F}{A} + \frac{Mc}{I} \quad (18)$$

4.5.1.6. Esfuerzos fluctuantes.

4.5.1.6.1. Esfuerzo sinusoidal completamente invertido.

Este esfuerzo a la fatiga se da cuando surge un movimiento fluctuante donde el mayor y menor esfuerzo equivalen a la misma magnitud, pero con dirección opuesta (Figura 17).

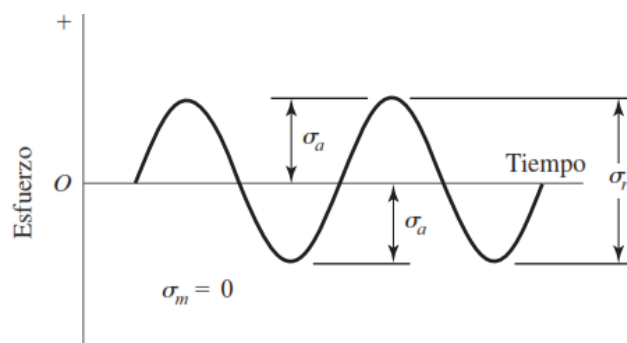


Figura 17. Esfuerzo sinusoidal completamente invertido.
Fuente: (Budynas y Nisbett, 2012).

El esfuerzo medio σ_m resulta de la suma del esfuerzo máximo y mínimo, pero al ser iguales y con sentido contrario este se reduce a cero. Consecuentemente, el esfuerzo alternante σ_a que resulta del esfuerzo máximo de fluctuación del muelle viene siendo el equivalente al esfuerzo al que este sometido el muelle.

Para conocer el factor de seguridad para un esfuerzo sinusoidal completamente invertido de un muelle, se considera la ecuación de la recta de Gerber (ecuación 19).

$$n_s = \frac{S_e}{\sigma_a} \geq 1 \quad (19)$$

Donde:

n_s : Factor de seguridad.

S_e : Límite de resistencia crítica a la fatiga en [MPa].

σ_a : Esfuerzo alternante en [MPa].

El límite a la resistencia crítica a la fatiga depende de factores que cuantifican los efectos de su condición, expresado en la ecuación 20.

$$S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f * S'_e \quad (20)$$

Donde:

k_a : Factor de modificación por la configuración superficial.

k_b : Factor de modificación por el tamaño.

k_c : Factor de modificación por la carga.

k_d : Factor de modificación por la temperatura.

k_e : Factor de confiabilidad.

k_f : Factor de modificación por efectos varios.

S'_e : Límite de resistencia a la fatiga en viga rotativa en [MPa].

El factor k_a depende del acabado superficial y la resistencia a la tensión, este factor se puede representar mediante la ecuación 21. Los acabados superficiales se encuentran en el Anexo 3.

$$k_a = a * S_{ut}^b \quad (21)$$

Donde:

a: Factor de acabado superficial.

S_{ut} : Resistencia a la tensión en [MPa].

b: Exponente de acabado superficial.

El factor de tamaño k_b se considera la ecuación 22, misma que va asociada al diámetro exterior del muelle.

$$k_b = \begin{cases} 1,24 * d^{-0,107} & \rightarrow 2,79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1,51 * d^{-0,157} & \rightarrow 51 \leq d \leq 254 \text{ mm} \end{cases} \quad (22)$$

Donde:

d: Diámetro exterior del muelle en [mm].

El diámetro exterior del muelle se determina según la geometría transversal del muelle y se expresa según la ecuación 23. El Anexo 3 muestra más a detalle el diámetro exterior según la geometría transversal.

$$d = \frac{0,808 * \sqrt{hb}}{0,370} \quad (23)$$

Donde:

h : Altura del muelle en [mm].

b : Base del muelle en [mm].

El factor de carga k_c equivale a la unidad cuando se encuentra sometido esfuerzo combinados con carga a la flexión, para esfuerzo axial puro equivale a 0,85 y para esfuerzo de tensión pura a 0,59 (Budynas y Nisbett, 2012).

El factor k_d se determina mediante los efectos de temperatura en la resistencia a la tensión del acero que se expresa en el Anexo 3.

Para el factor de confiabilidad k_e , se comienza midiendo la confiabilidad mediante el límite medio de resistencia a la fatiga que es mostrado en la ecuación 24, y finalmente se conoce el factor de confiabilidad por medio a la tabla mostrada en el Anexo 3.

$$S'_e = \begin{cases} 0,5 * S_{ut} & \rightarrow S_{ut} \leq 1400 \text{ MPa} \\ 700 \text{ MPa} & \rightarrow S_{ut} > 1400 \text{ MPa} \end{cases} \quad (24)$$

El factor de efectos variados k_f tiene el propósito de tomar en cuenta la reducción de resistencia a la fatiga debida a todos los otros efectos, sin embargo, los valores reales de los efectos variaos no siempre están disponibles si se presentan como anomalías que pueden ser: corrosión, recubrimiento electrolítico, metalizado por aspersion, entre otros, estas anomalías en los muelles pueden presentar este factor de efectos varios entre 0,5 a 0,14; cuando los mulles no presentan anomalías se considera la unidad.

4.5.2. Factor de seguridad

El factor de seguridad n_s es el resultado mayor a la unidad que se encuentra entre el esfuerzo admisible y el esfuerzo de diseño. El diseño es adecuado cuando n_s sea mayor a la unidad, y entre mayor sea ese valor, más seguro será el diseño. El factor de seguridad se puede expresar en la ecuación 25 como:

$$n_s = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{dis}} \geq 1 \quad (25)$$

Donde:

n_s : Factor de seguridad.

σ_{adm} : Esfuerzo admisible del material en [MPa].

σ_{dis} : Esfuerzo de diseño en [MPa].

(Hamrock et al., 2000) indica que la resistencia de un elemento mecánico depende de la clase, tratamiento, geometría del espécimen y también del tipo de carga a la que se somete.

También expone el método de Pugsley para determinar el factor de seguridad, el cual puede ser usado como guía cuando no se tiene experiencia con diseños similares, o si no se cuenta con criterios de diseño para guiarse (ecuación 26).

$$n_s = n_{sx}n_{sy} \quad (26)$$

Donde:

n_{sx} : Factor de seguridad que comprende de las características A, B y C.

n_{sy} : Factor de seguridad que comprende de las características D y E.

Los factores de seguridad n_{sx} y n_{sy} se pueden encontrar en el Anexo 4.

4.5.3. Factor de servicio

El factor de servicio (f_s) en un motor, se expresa cómo la capacidad de potencia que puede brindar un motor sin que sufra daños, de igual manera para una máquina, se expresa como el porcentaje adicional de potencia que tiene que considerar para diseñar un componente mecánico.

En el Anexo 5 se muestran los valores del factor de servicio recomendados según sus aplicaciones.

4.5.4. Transmisión de potencia

4.5.4.1. Potencia nominal.

Es la potencia máxima requerida por una máquina o equipo en condiciones normales de uso, esto significa que el equipo está diseñado para soportar esa cantidad de potencia, pero debido a fluctuaciones de corriente, uso continuo o excesivo, así como también las situaciones

de uso distintas a las del diseño, hacen que su potencia real pueda diferir de la nominal, siendo más alta o más baja (Silva Cueva, 2015). La potencia nominal en función del torque y velocidad angular se expresa en la ecuación 27 y en función de la fuerza y velocidad lineal se expresa en la ecuación 28.

$$Pot_{nom} = M\omega \quad (27)$$

$$Pot_{nom} = Fv \quad (28)$$

Donde:

Pot_{nom} : Potencia nominal en [W].

M : Torque en [Nm].

ω : Velocidad angular en [rad/s].

F : Fuerza en [N].

v : Velocidad lineal en [m/s].

La velocidad angular se la puede denotar en términos de rpm (revoluciones por minuto) o frecuencia, ecuación 29 y ecuación 30, respectivamente. También la frecuencia se puede ver en términos de periodo (tiempo), ecuación 31.

$$\omega = n * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} * \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} \quad (29)$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi \text{ rad}} \quad (30)$$

$$T = \frac{1}{f} \quad (31)$$

Donde:

n : Revoluciones por minuto en [rpm] o [min^{-1}].

f : Frecuencia en [Hz] o [1/s].

T : Periodo en [s].

De igual manera se puede determinar la velocidad lineal, multiplicando la velocidad angular por el radio de curvatura, ecuación 32.

$$v = \omega r \quad (32)$$

Donde:

v : Velocidad lineal en [m/s].

r : Radio de curvatura en [m].

4.5.4.2. Potencia de diseño.

La potencia de diseño es la que se emplea para el cálculo y selección de un motor, donde se considera el factor de servicio y de la misma forma el factor de seguridad, ecuación 33.

$$Pot_{dis} = Pot_{nom} * f_s * n_s \quad (33)$$

Donde:

Pot_{dis} : Potencia de diseño en [W].

4.5.5. Volante de inercia

Es un elemento pasivo y solo aporta inercia al sistema, permitiendo almacenar energía cinética. El volante sigue moviéndose por inercia cuando cesa el par motriz que lo impulsa. De esta manera, el volante resiste cambios bruscos en el movimiento de rotación, suavizando en flujo de energía entre la fuente y la carga.

La energía cinética de un equipo que parte del reposo es igual al torque que se requiere para realizar el movimiento, en consecuencia, se pueden expresar en las siguientes fórmulas que se expresan en la ecuación 34 (despejada de la ecuación 27) y la ecuación 35.

$$M = \frac{Pot_{req}}{\omega} \quad (34)$$

$$Ec = \frac{Ine * \omega^2}{2} \quad (35)$$

Donde:

M : Torque en [Nm].

Ec : Energía cinética en [Nm] o [J]

Pot_{req} : Potencia requerida para el movimiento en [W].

ω : Velocidad angular a la que gira el eje en [rad/s].

I_{ne} : Inercia que requiere el volante en [kg m²].

La geometría adecuada en los volantes de inercia es de forma de disco redondo (en el Anexo 6 se muestran algunas propiedades geométricas). La inercia de un volante de disco redondo se expresa en la ecuación 36, el volumen se obtiene del producto de la masa dividida para la densidad del material con el cual se construye (ecuación 37), mientras que el espesor es el resultado del volumen dividido para el área de dicho disco redondo, ecuación 38.

$$I_{ne} = \frac{m_{vol} * R^2}{2} \quad (36)$$

$$V_{vol} = \frac{m_{vol}}{\rho_{vol}} \quad (37)$$

$$e_{vol} = \frac{V_{vol}}{\pi R^2} \quad (38)$$

Donde:

m_{vol} : Masa del volante de inercia en [kg].

R : Radio del volante de inercia en [m].

V_{vol} : Volumen del volante de inercia en [m³].

ρ_{vol} : Densidad del volante de inercia en [kg/m³].

e_{vol} : Espesor del volante de inercia en [m].

4.5.6. Rodamientos

Los rodamientos son elementos mecánicos que cumplen el rol de reducir la fricción de movimiento de giro entre un eje y la pieza conectada.

El método de cálculo normalizado según ISO 281:2007, la vida nominal es (ecuación 39):

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (39)$$

Donde:

L_{10} : Vida nominal (con un 90% de fiabilidad) en [10⁶ revoluciones].

C : Capacidad de carga dinámica en [kN].

P : Carga dinámica equivalente en [kN].

p: Exponente de vida (3 para rodamientos de bolas y 3/10 para rodamientos de rodillos).

Si la velocidad del rodamiento es constante la duración se puede expresar en horas, ecuación 40.

$$L_{h10} = \frac{L_{10} * 10^6}{n * 60} \quad (40)$$

Donde:

L_{h10} : Vida nominal en [h].

n: Revoluciones por minuto en [min^{-1}].

Para la obtención de la carga dinámica equivalente P se consideran cargas y factores radiales y axiales, ecuación 41.

$$P = X * F_r + Y * F_a \quad (41)$$

Donde:

X: Factor radial.

F_r : Carga radial en [kN].

Y: Factor axial.

F_a : Carga axial.

4.5.7. Pernos

Es un elemento metálico de unión que permite unir y asegurar objetos. Por lo general, están hecho de acero o hierro de dureza o calidad variable. Disponen de diferentes tipos de cabeza según su aplicación (hexagonal, redonda, avellanada, etc.) y las roscas pueden ser métricas o en pulgadas.

4.5.7.1. Esfuerzo cortante transversal en el perno.

Es el que se considera para el barrido en los hilos de rosca donde se considera el diámetro menor y las fuerzas que actúan en el perno, ver ecuación 42.

$$\tau = \frac{3 * (F + F_i)}{\pi * d_r * n_t * p} \quad (42)$$

Donde:

τ : Esfuerzo cortante de un perno en [lb/in²] o [N/m²]

F : Carga normal al perno en [N].

F_i : Precarga en [lb] o [N].

d_r : Diámetro menor del perno en [in] o [m].

n_t : Número de roscas en contacto.

p : Paso del perno en [in] o [m].

En la precarga, para conexiones no permanentes (sujetadores reutilizados) y para conexiones permanentes, (Budynas y Nisbett, 2012) recomienda trabajar respectivamente con el 75% y 90% la carga de prueba (ecuación 43). La carga de prueba se muestra en la ecuación 44.

$$F_i = \begin{cases} 0,75 * F_p & \text{para conexiones no permanentes} \\ 0,90 * F_p & \text{para conexiones permanentes} \end{cases} \quad (43)$$

$$F_p = A_t * S_p \quad (44)$$

Donde:

F_p : Carga de prueba en [lb] o [N].

A_t : Área de esfuerzo de tensión en [in²] o [m²].

S_p : Resistencia de prueba mínima en [kpsi] o [MPa].

4.5.7.2. Esfuerzo de tensión en el perno.

Consiste en la unión de un perno que se encuentra sometido a tensión, donde a su tensión se le suma su precarga de ajuste, ver ecuación 45.

$$\sigma_b = \frac{F_{req} + F_i}{A_t} \quad (45)$$

Donde:

σ_b : Esfuerzo de tensión en el perno en [MPa] o [kpsi]

4.5.8. Mecanismo biela manivela corredera

El mecanismo de biela-manivela-corredera mostrado en la Figura 18, cuenta con un grado de libertad debido a que convierte el movimiento circular a movimiento lineal, este mecanismo se considera de clase I ya que al menos un elemento realiza un giro completo (manivela).

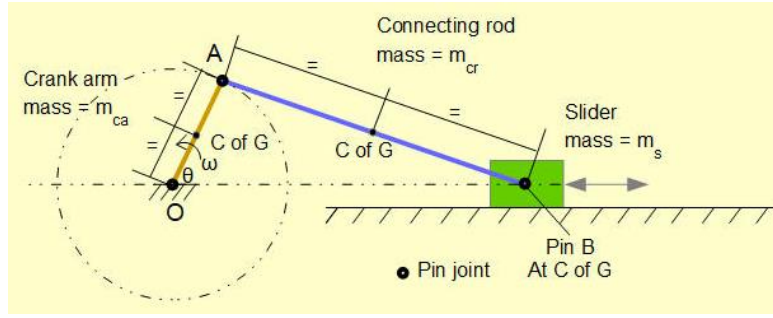


Figura 18. Mecanismo de biela- manivela- corredera.
Fuete: (Alistair, 2020).

Para resolver este tipo de problemas, se establece un método gráfico computacional simple llamado método de palanca rígida de Zhukosvki, donde expresa que si cualquier mecanismo con un grado de libertad está en equilibrio con un sistema de fuerzas (con fuerzas compensadoras) que actúan en puntos del mecanismo; el diagrama de velocidades estará girado a 90 grados, considérela como si girara alrededor de un polo (p) la palanca carga la misma fuerza que actúa sobre el mecanismo (aplicada al punto correspondiente en el diagrama de velocidades). Así mismo, se utiliza el principio de D'alembert quien manifiesta que cualquier sistema en movimiento acelerado está en equilibrio dinámico si se suma una fuerza de inercia correspondiente a todas las fuerzas externas que actúan sobre él.

Para el método gráfico; se consideran coeficientes de escala para hacer referencia a las distancias que se grafiquen según la posición (k_{pos} [m/mm]), velocidad (k_{vel} [m/s/mm]) y aceleración (k_{ace} [m/s²/mm]).

Para el tramo de la manivela de la Figura 18, la velocidad en el punto A se expresa de la misma manera que la ecuación 32 ($v = \omega r$), la velocidad de A se representa en el diagrama de velocidades por el segmento (\overline{pa}) (el punto (p) hace mención al origen (O)), el cual se determina utilizando el coeficiente k_{vel} (ecuación 46):

$$\overline{pa} = \frac{\vec{v}_A}{k_{vel}} \quad (46)$$

Donde:

\overline{pa} : Segmento de la velocidad para el punto A en [mm].

\vec{v}_A : Velocidad en el punto A en [m/s].

k_{vel} : Coeficiente de velocidad en [m/s/mm].

El segmento (\overline{pa}) parte del polo (p) hacia el punto A y debe ser perpendicular a la manivela OA representada en el plano del mecanismo. Su dirección es la misma que la dirección de la velocidad angular (ω_1) en este primer punto los demás valores de velocidad son consecuencia del gráfico multiplicado por el factor de velocidad k_{vel} que se proyecte (ecuaciones 47, 48), donde se considera \vec{v}_B paralela al eje de las abscisas y \vec{v}_{BA} perpendicular al punto AB. A manera de ejemplo en la Figura 19 se muestra un diagrama de velocidades.

$$\vec{v}_B = \overline{pb} * k_{vel} \quad (47)$$

$$\vec{v}_{BA} = \overline{ab} * k_{vel} \quad (48)$$

Donde:

\vec{v}_B : Velocidad con respecto al punto B en [m/s].

\overline{pb} : Segmento en la velocidad para el punto B en [mm].

\vec{v}_{BA} : Velocidad del punto B con respecto al punto A en [m/s].

\overline{ab} : Segmento en la velocidad del punto B con respecto al punto A en [mm].

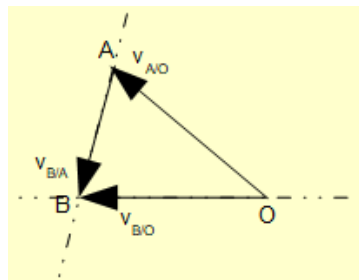


Figura 19. Ejemplo de diagrama de velocidades.
Fuente: (Alistair, 2020).

Para la velocidad angular ω_2 del segundo elemento de movimiento (biela) se emplea despejando la ecuación 32, donde se considera simplemente la biela que abarca el segmento de los puntos AB.

Para la aceleración normal en el punto A (ecuación 49) y la aceleración normal del punto B con respecto al punto A se emplea la ecuación 50.

$$\overline{a^{\vec{n}}_A} = L_{OA} * \omega_1^2 \quad (49)$$

$$\overline{a^{\vec{n}}_{BA}} = \frac{\vec{v}_{BA}^2}{L_{AB}} \quad (50)$$

Donde:

\vec{a}_{A}^n : Aceleración normal con respecto al punto A en [m/s²].

L_{OA} : Distancia entre el punto O y A (manivela) en [m].

ω_1 : Velocidad angular del primer elemento (manivela) en [rad/s²].

\vec{a}_{BA}^n : Aceleración normal del punto B con respecto al punto A en [m/s²].

L_{AB} : Distancia en el punto A y B (biela) en [m].

El diagrama de aceleraciones se grafica sabiendo que las distancias de las aceleraciones de los segmentos mostrados en la Figura 20 son iguales a la aceleración del dicho segmento dividido para el coeficiente de aceleración (k_{ace}) de forma similar a lo expuesto en la ecuación 46. Para la representación gráfica, el trazo de la aceleración tangencial (\vec{a}_{BA}^t) es perpendicular a el segmento AB y parte de la aceleración normal (\vec{a}_{BA}^n), la aceleración del punto B (\vec{a}_B) es paralela al eje de las abscisas.

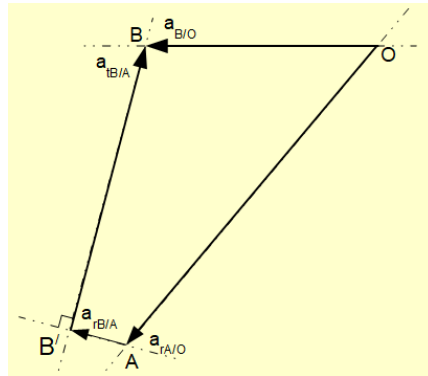


Figura 20. Representación gráfica de las aceleraciones.
Fuente: (Alistair, 2020).

La aceleración angular ξ es el resultado de la aceleración tangencial dividido para el radio de giro (ecuación 51) y en este tipo de sistema biela-manivela-corredera solo se encuentra en la biela; la manivela mantiene una velocidad angular constante y la corredera solo se traslada, por ende, sus aceleraciones angulares son cero.

$$\xi = \frac{\vec{a}_{BA}^t}{L_{AB}} \quad (51)$$

Donde:

ξ : Aceleración angular en [s⁻²].

Para la determinación del peso de cada elemento se utiliza la ecuación 4 ($P = mg$), mismo que se encuentran en su centro de masa, para conocer la distancia del centro de masa de cada elemento, se mide la distancia en la gráfica y se multiplica para el coeficiente de aceleración (k_{ace}) (ver Figura 21).

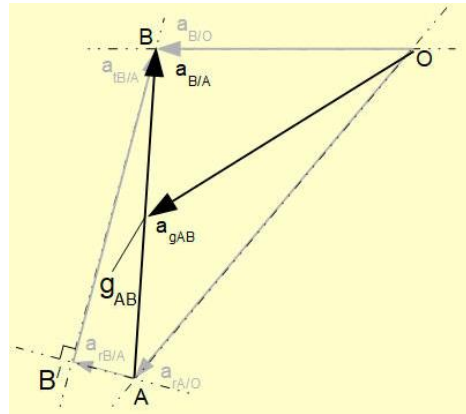


Figura 21. Grafica de los centros de masa de cada elemento según su aceleración.
Fuente: (Alistair, 2020).

Para la determinación de la fuerza de inercia de cada elemento se considera la masa del elemento por la aceleración con la que se mueve, y esa fuerza se calcula con la ecuación 3 ($F = ma$). De igual manera, para la determinación del momento de inercia se considera la inercia del elemento por su aceleración angular (ecuación 52).

$$M_{in} = Ine * \xi \quad (52)$$

Donde:

M_{in} : Momento de inercia en [Nm].

Finalmente, tras conocer los pesos, fuerzas, distancias, momentos de inercia y movimiento del sistema, se procede a realizar una sumatoria de momentos con respecto al punto (p) para posteriormente despejar la fuerza compensadora ($P_{eq.}$). El torque equivalente ($M_{eq.}$) se obtiene multiplicando dicha fuerza por la distancia de la manivela (ver ecuación 53).

$$M_{eq.} = P_{eq.} * L_{OA} \quad (53)$$

Donde:

$M_{eq.}$: Torque equivalente en [Nm].

Para conocer la potencia nominal o equivalente se hace uso de la ecuación 27 ($Pot_{nom} = M\omega$).

4.6. Capítulo 6: Fundamentos de instalaciones eléctricas

4.6.3. Características de componentes eléctricos

- Conductor: Encargado de la transmisión de potencial eléctrica, la capacidad de corriente que soporta está en función de su calibre.
- Disyuntor termomagnético (breaker): Dispositivo encargado del corte inmediato para protección del circuito ante sobrecargas o sobrecorrientes.
- Contactor: Componente que permite un control para accionamiento de un equipo.
- Relé térmico: encargado de proteger el equipo eléctrico ante un aumento de temperatura reflejada en la corriente eléctrica de consumo.
- Motor: Elemento que se alimenta de energía eléctrica para transformarla en energía mecánica.
- Variador de frecuencia: Permite la variación de frecuencia que proviene de la red y con ello se modifica la velocidad de giro de los motores, además cabe recalcar que al subir o bajar las revoluciones, el torque del motor se mantiene en sus condiciones normales.
- Parada de emergencia: Realiza el apagado inmediato mediante el circuito de control.
- Pulsador normalmente abierto (NO): Permite el paso de energía cuando está presionado.
- Pulsador normalmente cerrado (NC): No permite el paso de energía al estar presionado.

5. Metodología

El desarrollo de este trabajo ha requerido los siguientes materiales y herramientas.

- *Equipos y materiales de oficina:* Computadora, libros, internet, cuaderno, calculadora científica entre otros.
- *Softwares y herramientas de computador:* Paquete Office, AutoCAD 2018, SOLIDWORKS 2020 y Zotero.
- *Equipos de construcción eléctrica y mecánica:* Soldadora eléctrica, torno, taladro manual y de banco, amoladora, esmeril, sierra metálica, machuelo, pinzas de acero, nivel imantado, escuadra, calibrador, compás metálico, juego de llaves y destornilladores.

Para el adecuado diseño del prototipo clasificador densimétrico de café se estructuró y cumplió con la siguiente metodología:

- *Búsqueda de información.* Se consulta información referente a cómo se realiza la clasificación de café por densidad mediante búsqueda online (manuales, fichas técnicas, tesis, etc.) para la conceptualización de las diversas máquinas y obtención de los parámetros influyentes en la misma.
- *Reconocimiento de tipos de clasificadoras densimétricas.* Se realiza un estudio de los tipos de máquinas densimétricas de café y otros productos similares por medio de sus fichas técnicas y manuales, para posteriormente analizar sus parámetros operacionales como: capacidad de producción, niveles de clasificación, consumo energético y más.
- *Definición del tipo de máquina densimétrica que más se acople a las necesidades de clasificación.* Aquí se realiza un proceso comparativo de selección mediante una matriz de ponderación de criterios técnicos para así definir que tipo de máquina es la que más se ajusta a los requerimientos de clasificación.
- *Definir los sistemas y componentes principales de la máquina.* Se examinan y sintetizan los sistemas y componentes más importantes con los cuales la máquina puede clasificar adecuadamente, y luego se analiza cómo funcionan para una mejor comprensión de cada uno. Esta información es fundamental para proponer la sollicitación mecánica, los esfuerzos y geometrías.
- *Diseño conceptual del prototipo de prueba.* Se realiza una propuesta de prototipo en base a máquinas análogas existentes en la industria para con ello, proyectar la forma y distribución de los sistemas del tipo de prototipo clasificador densimétrico que se desea diseñar.

- *Fase experimental para definir los parámetros de operación del prototipo.* Se ejecuta un proceso experimental variando los parámetros de flujo de aire, inclinaciones según los grados de libertad a lo largo y ancho de la mesa, frecuencia de giro y amplitud de oscilación, valores que se fueron variando respectivamente con un valor de 20 por ciento en cada cambio en la entrada de aire, de un centímetro, de un Hertz y de medio centímetro, hasta alcanzar sus valores óptimos que generen una clasificación por densidad idónea.
- *Diseño de prototipo final.* Aquí se deben ejecutar mecanismos eficaces, teniendo en cuenta las variables técnicas del clasificador densimétrico experimentado, además, se eligen teorías de cálculo adecuadas, teniendo en cuenta las condiciones a las que se verán sometidos los sistemas, con el fin de ajustar adecuadamente sus dimensiones. De igual manera, se debe considerar las normas que permitan la selección de los demás componentes, con respecto al tipo de carga, esfuerzos, material, etc.
- *Accionamiento eléctrico de la máquina.* Se considera la aparatenta eléctrica del prototipo en cuestión que permita el accionamiento correcto del equipo, posterior a ello se elabora un esquema eléctrico en el software Cade Simu, donde se presenta el circuito de fuerza y control, para con ello dejar claro el accionamiento manual que rige sobre la máquina.
- *Pruebas operacionales.* Aquí se evalúa el funcionamiento acorde a los parámetros operacionales determinados en la etapa experimental para constatar el funcionamiento adecuado del prototipo.
- *Diseño de detalle.* Aquí se expone el resultado final de los sistemas y componentes de importancia del prototipo mediante la demostración en físico y explicación técnica detallada de los mismos, para con ello dar por culminada la máquina.
- *Análisis de costos del prototipo final.* Aquí se realiza un análisis de los costos de materiales, partes, piezas, y proceso constructivo de la máquina para estimar su precio.

La Figura 22 muestra en síntesis la metodología a seguir para la resolución del presente trabajo de tesis.

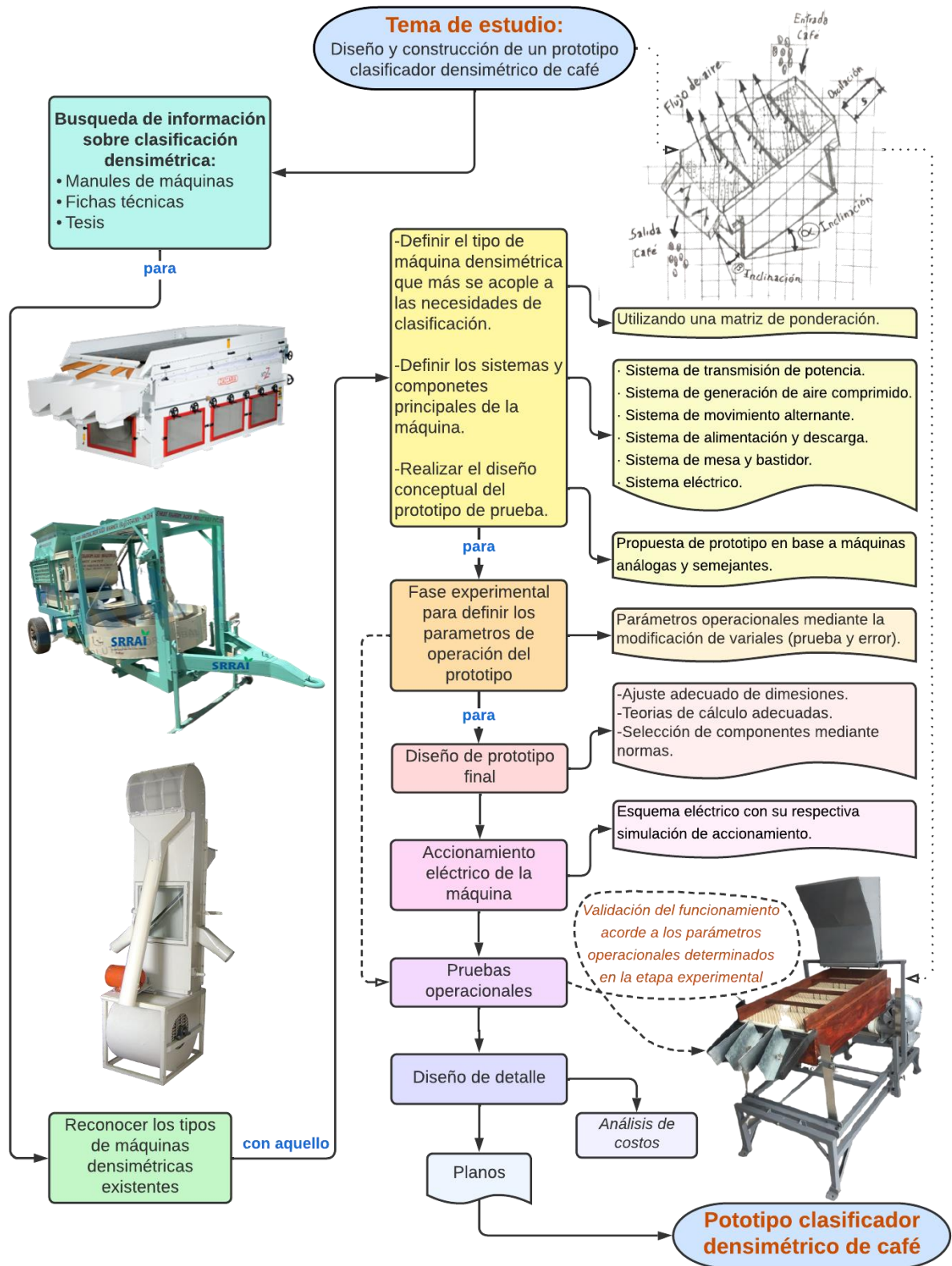


Figura 22. Diagrama de flujo de la metodología a seguir en el presente trabajo de tesis.
Fuente: Autor.

6. Resultados

6.1. Recopilación de información previa a la clasificación por densidad

Se optó por indagar en fuentes audio visuales, fichas técnicas, manuales como: (HnosARCEltda, 2013), (Meza y Sornoza, 2017), (ZACCARIA, s.f.), (Indiamart, 2022), (Solocafé, 2023), (AgriEXPO, 2019), (Compañía de suministro de molinos de semillas de la costa oeste, 2015), (Equipo de semillas de comerciantes de productos básicos, 2016), (Fabricación de LMC, 2017), (LMC LEWIS M. CARTER), (Oliver Manufacturing, 2013), (PERFECT DAILY GRIND, 2021), (NAVAB BHAI, 2021), (Cimbria, 2015); referentes a la clasificación densimétrica donde se pudo ver que influyen diversas acciones como es el caso del flujo de aire, oscilación, inclinaciones, e incluso el grano a clasificar, además se encuentra la sugerencia de que se realice una clasificación previa por tamaño, con el fin de que no se requieran hacer repasos con la máquina densimétrica.

Con respecto a la clasificación por tamaño previo a la clasificación densimétrica, (Lafebre Álvares, 2019) expone los planos correspondientes de las cribas del Nro. 12 al Nro. 18 con su distribución de agujeros y tamaños (Anexo 9). El proceso de construcción de las cribas se manifiesta en el Anexo 10.

6.2. Selección de máquina clasificadora densimétrica para prototipado

Debido a que existen diversas referencias sobre tipos de máquinas destinadas a la clasificación por densidad (tipo mesa, circular y columna), la Tabla 2 muestra una comparativa de los tipos de máquinas densimétricas.

Tabla 2. Tipos de máquinas clasificadoras densimétricas.

Tipo de máquina	Funcionamiento	Modelo	Capacidad [qq/h]	Potencia [Hp]	Aplicación
Mesa	Su clasificación se da mediante un movimiento de vaivén, inclinaciones y flujo de aire (Figura 1).	MDZ-120	110 - 158	13,3	Arroz, frijoles, semillas, café, entre otros seriales.
Circular	Lo hace mediante vibración en forma circular (Figura 2).	SRRAI-TACTOR-MOTOR	2,3	7,5	Maní
Columna	Limpia los granos y realiza la primera clasificación densimétrica mediante flujo de aire (Figura 3).	SC-CAN40	5,3	7,5	Café

Fuente: Autor.

Se precisa realizar una matriz de ponderación con varios criterios a considerar para la selección óptima entre sus procesos tecnológicos (Clasificación de los granos de café, Facilidad de fabricación y manufactura, y Facilidad de mantenimiento) mostradas en el Anexo 11.

6.3. Definición de componentes principales y sistemas de la máquina

Después de seleccionar el tipo y haber determinado las características de la máquina clasificadora por densidad “tipo mesa”, se realizó un análisis de modelos ya construidos como son: clasificadora por densidad SG-8 (HNOS ARCE LTDA, 2018), clasificadora por densidad SG-60 (HNOS ARCE LTDA, 2018), mesa densimétrica MDZ-120 (ZACCARIA, s.f.), mesa densimétrica SDS-120 (Silomax, 2020), separador gravimétrico LMC (LMC LEWIS M. CARTER), modelos de mesas densimétricas Cimbra GA (Cimbria, s.f.), entre otras; esto con el fin de precisar los componentes principales y sistemas de las mismas para poder definir el prototipo a construir.

Estas máquinas funcionan con un eje excéntrico, el cual va conectado a una biela, de manera que la mesa pueda moverse alternativamente de atrás hacia adelante; de acuerdo al número de revoluciones y excentricidad será la velocidad y magnitud del movimiento respectivamente. En la Figura 23 se muestra el principio de excentricidad con el sistema biela-manivela que se pretende implementar posteriormente.

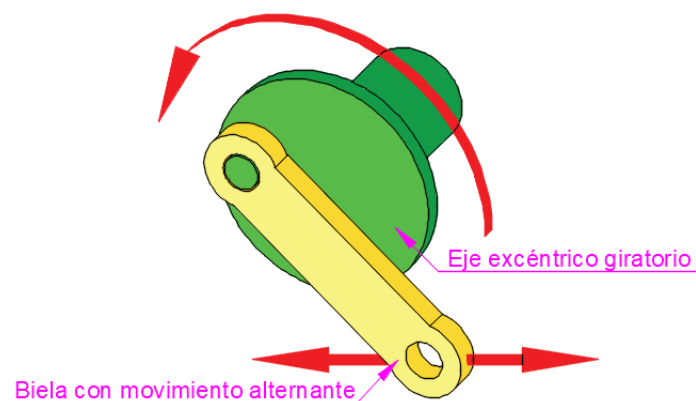


Figura 23. Principio de excentricidad.

Fuente: Autor.

Con base en lo expuesto anteriormente, los componentes principales y/o indispensables que definen el diseño de la máquina clasificadora densimétrica de café, son las siguientes:

- *Tolva*, para la entrada y distribución de los granos de café.
- *Paletas móviles*, para la salida y orientación de los granos de café.
- *Eje excéntrico*, para la oscilación de la mesa.
- *Columnas flexibles*, para permitir el libre movimiento oscilatorio.
- *Banda lineal*, para el brincoteo de los granos de café.
- *Orificios en mesa*, para la salida del flujo de aire de manera perpendicular.

- *Soplante*, para expulsar aire por la mesa y lograr que los granos de café ligeros se mantengan encima de los pesados.

6.4. Diseño conceptual del prototipo de prueba

Para establecer las ideas y conceptos básicos de diseño, se consideraron los componentes y sistemas de los clasificadores densimétricos existentes, dichos sistemas son los siguientes:

- Sistema de transmisión de potencia.
- Sistema de generación de aire.
- Sistema de movimiento alternante.
- Sistema de alimentación y descarga.
- Sistema de mesa y bastidor.
- Sistema eléctrico.

Para realizar la construcción de la propuesta del prototipo experimental, se comenzó con la construcción de un cajón de madera, el cual cuenta con un agujero de 3” en uno de sus costados para la entrada del flujo de aire; en la parte superior del cajón se colocó una plancha de *plywood* de 4 mm de espesor con 1425 agujeros de 3/32” de diámetro distribuidos junto a bandas lineales de nylon entre la división de los agujeros por donde fluirá el aire que proviene de un soplante, también se colocan unos apliques para colocar los soportes que van empernados a los costados, mismos que son encargados de permitir el movimiento oscilatorio (Figura 24).

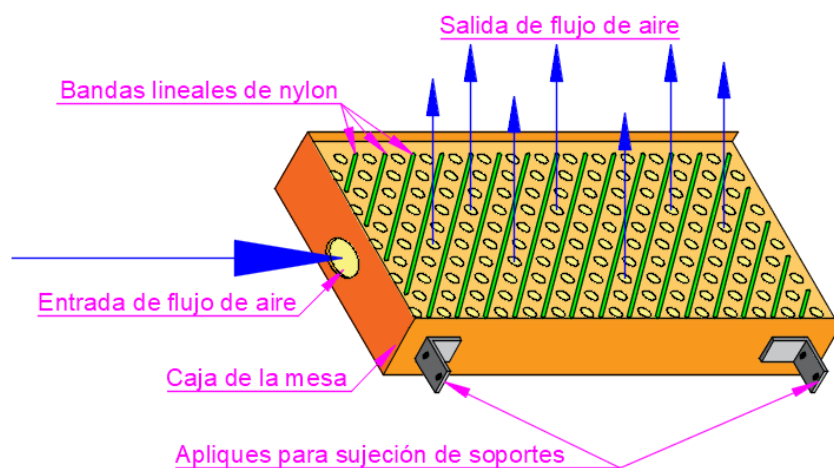


Figura 24. Bosquejo de caja de la mesa.

Fuente: Autor.

Se ha propuesto un diseño de tolva para la distribución adecuado del grano de café en el sistema de alimentación de la máquina, acorde a las dimensiones de la misma (Figura 25).

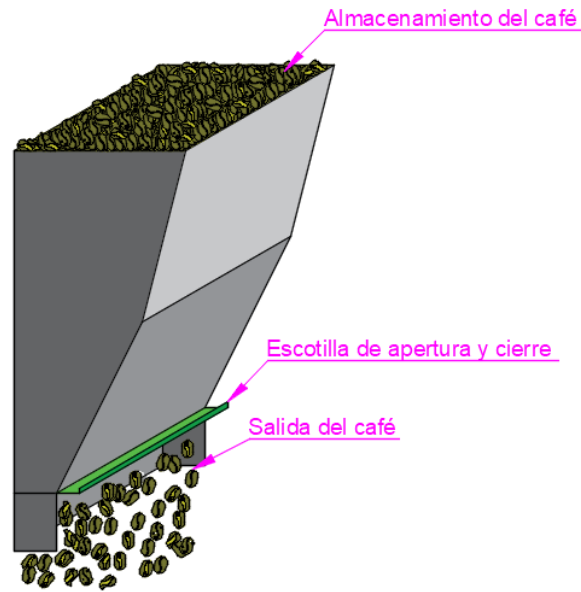


Figura 25. Bosquejo de tolva.
Fuente: Autor.

A la caja de la mesa se le fija una rampa con paletas móviles por donde se direcciona la salida de los granos de café ya clasificados (Figura 26).

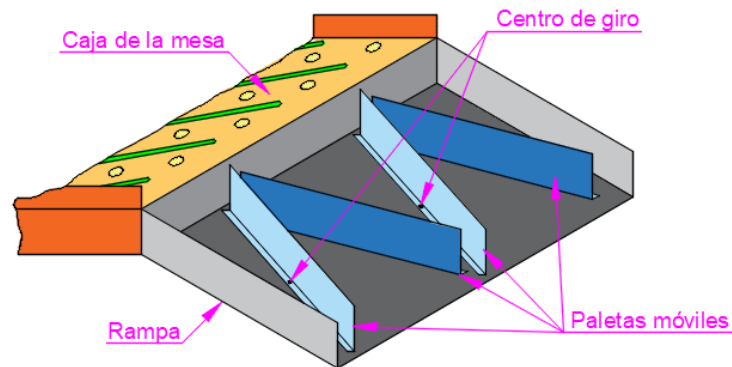


Figura 26. Bosquejo de paletas móviles.
Fuente: Autor.

Para los soportes se consideran planchas cortadas de acero inoxidable AISI 304 de dimensiones 400*50*4 mm para regular la altura de la mesa. La forma del soporte lo representa el esquema de la Figura 27.

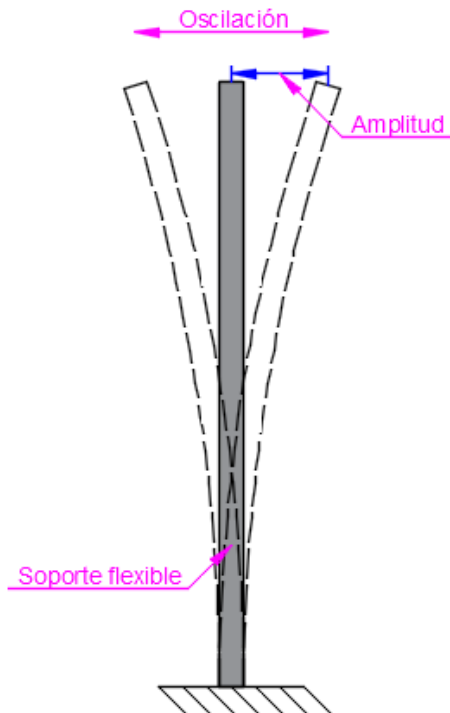


Figura 27. Bosquejo de soportes.
Fuente: Autor.

Para el bastidor se consideran dos grados de libertad: inclinación a lo largo y ancho de la mesa (α y β), además, el bastidor debe contar con sujeción al piso por ende se ubican ángulos con agujeros soldados a las patas de la misma (Figura 28). La regulación de las inclinaciones se propone en el centro de la base móvil (A y B) donde se regula las alturas.

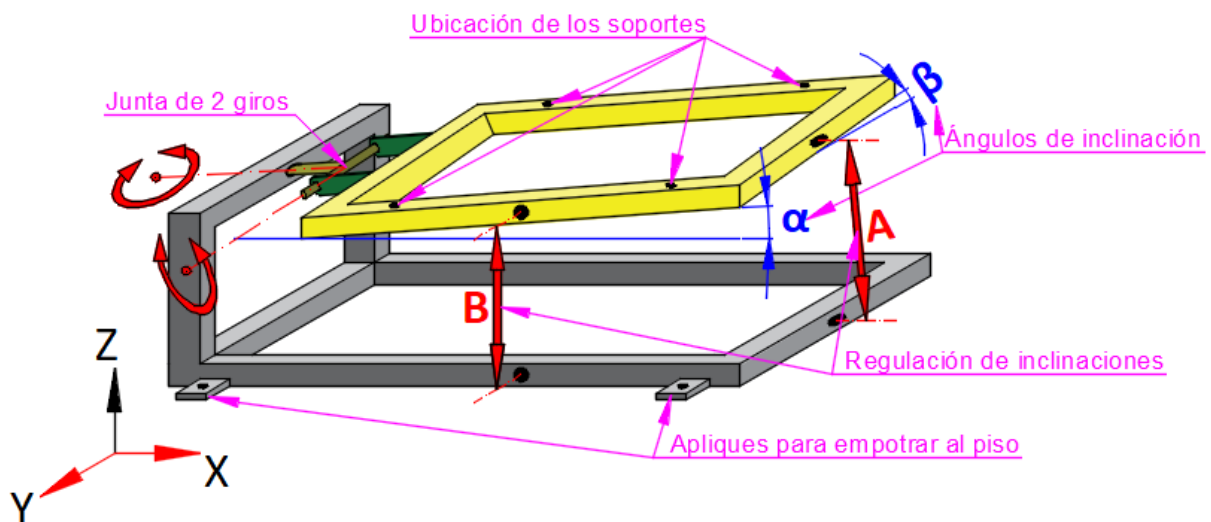


Figura 28. Bosquejo de bastidor.
Fuente: Autor.

El eje excéntrico se constituye de una placa de acero y una barra agujereada, dicha excentricidad permite la unión de la biela con ayuda de un perno (Figura 29).

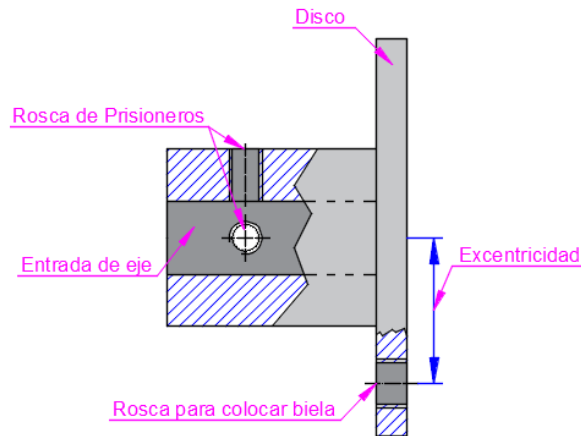


Figura 29. Bosquejo de eje excéntrico.
Fuente: Autor.

Para la biela se considera un sistema de regulación de longitud basado de una varilla y un tubo roscado (Figura 30).

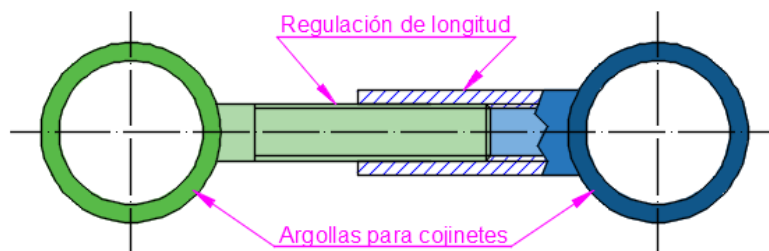


Figura 30. Bosquejo de biela.
Fuente: Autor.

El proceso de construcción del prototipo experimental se muestra en el Anexo 12, cabe recalcar que se realizaron mejoramientos conforme se fue ejecutando la fase experimental.

6.5. Fase de experimentación para la definición de los parámetros de operación del prototipo

En busca de la obtención de los parámetros operacionales del prototipo en cuestión, se han fijado como constantes a los siguientes criterios:

- El tamaño (Nro. 18), humedad (12 %), densidad (800 kg/m^3) y tipo de café (caturra).
- Distribución de los agujeros y bandas lineales de la mesa, así como también sus dimensiones.

Los parámetros operacionales que se pretenden determinar son: ángulos de inclinación en $[\circ]$ a lo largo y anchos designados respectivamente por las legras griegas α y β , flujo de aire

que sale por la mesa en [m/s], velocidad de giro del motor en [rpm], y la amplitud del eje excéntrico en [cm] que se denota con la letra S.

Las inclinaciones se realizan variando la altura en el centro de dos costados (derecho y trasero) del bastidor, estas inclinaciones son posibles por la junta de dos giros que se encuentra en la parte frontal de dicho bastidor, así como lo muestra el bosquejo de la Figura 28, las alturas (A y B) se gradúan por medio de un mecanismo de sujeción y en base a aquello se obtiene los dos ángulos de inclinación que varía uno respecto al otro por encontrarse en el centro de cada costado, se presenta en la siguiente Tabla 3 los ángulos de inclinación medidos.

Tabla 3. Ángulos de las inclinaciones de la mesa según las alturas A y B.

Altura en A [cm]	Ángulo en α [°]	Altura en B [cm]	Ángulo en β [°]
1	0,49	0,5	0,03
		1	0,98
		1,5	1,94
		2	2,89
		2,5	3,85
		3	4,8
2	0,98	0,5	-0,9
		1	0,06
		1,5	1,01
		2	1,97
		2,5	2,92
		3	3,88
3	1,48	0,5	-2
		1	-0,87
		1,5	0,09
		2	1,04
		2,5	2
		3	2,95

Fuente: Autor.

Para la determinación del flujo de aire se utiliza un soplante de 1 Hp de potencia (5" de diámetro de salida de aire) donde se propone dividir la posición de la escotilla de entrada de aire del soplante (Q_i), en secciones de Q1 [abierto (60°)], Q2 [semiabierto (40°)], Q3 [semicerrado (20°)] y Q4 [cerrado (0°)].

Para el proceso de regulación de las revoluciones por minuto del motor, se hace por medio de un variador de frecuencia de la marca LS IS (industrial Systems) modelo iG5A de la serie SV022 iG5A-255022000C22 que permite variar de 0.1 Hz a 400 Hz la frecuencia que viene de la red eléctrica

En cuanto a la amplitud de la excentricidad, se construye un eje excéntrico con 6 agujeros roscados (con distancias de 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm y 30 mm) con el fin de

contar con un eje excéntrico que permita diversas amplitudes según como se vaya requiriendo en la experimentación.

El tipo de grano de café con el que se realizó la experimentación es de la variedad caturra, su tamaño fue clasificado previamente con una criba del Nro. 18, donde se escogieron los más grandes, es decir los granos de café que no pasaron ante dicha criba, debido que en teoría son más pesados, por ende, el flujo de aire que se requiera en esta fase experimental será capaz de mover sin problema los granos de café más pequeños.

En la altura de los soportes oscilantes se eleva la mesa hasta obtener al tacto una suavidad y con ello ocupar una baja fuerza al momento de mover la mesa, esta altura propuesta de 0,268 m permite oscilar con suavidad una amplitud de 10 mm, restringiendo la primera propuesta del modelo experimental. Por otro lado, al realizar unos primeros recorridos del café, se decide partir con una frecuencia de 4 Hz debido ya que al utilizar frecuencias más bajas el proceso de calificación se vuelve demasiado lento y variando de 1 Hz en 1 Hz se limita hasta los 6 Hz debido a que hasta esta frecuencia el prototipo experimental se asemeja demasiado a los comportamientos de clasificación densimétricos vistos anteriormente en fuentes audio visuales.

Partiendo de esta primera propuesta del modelo experimental se realiza un diagrama de flujos de como se desempeñó el proceso prueba-error en búsqueda de las condiciones operacionales del prototipo, Figura 31.

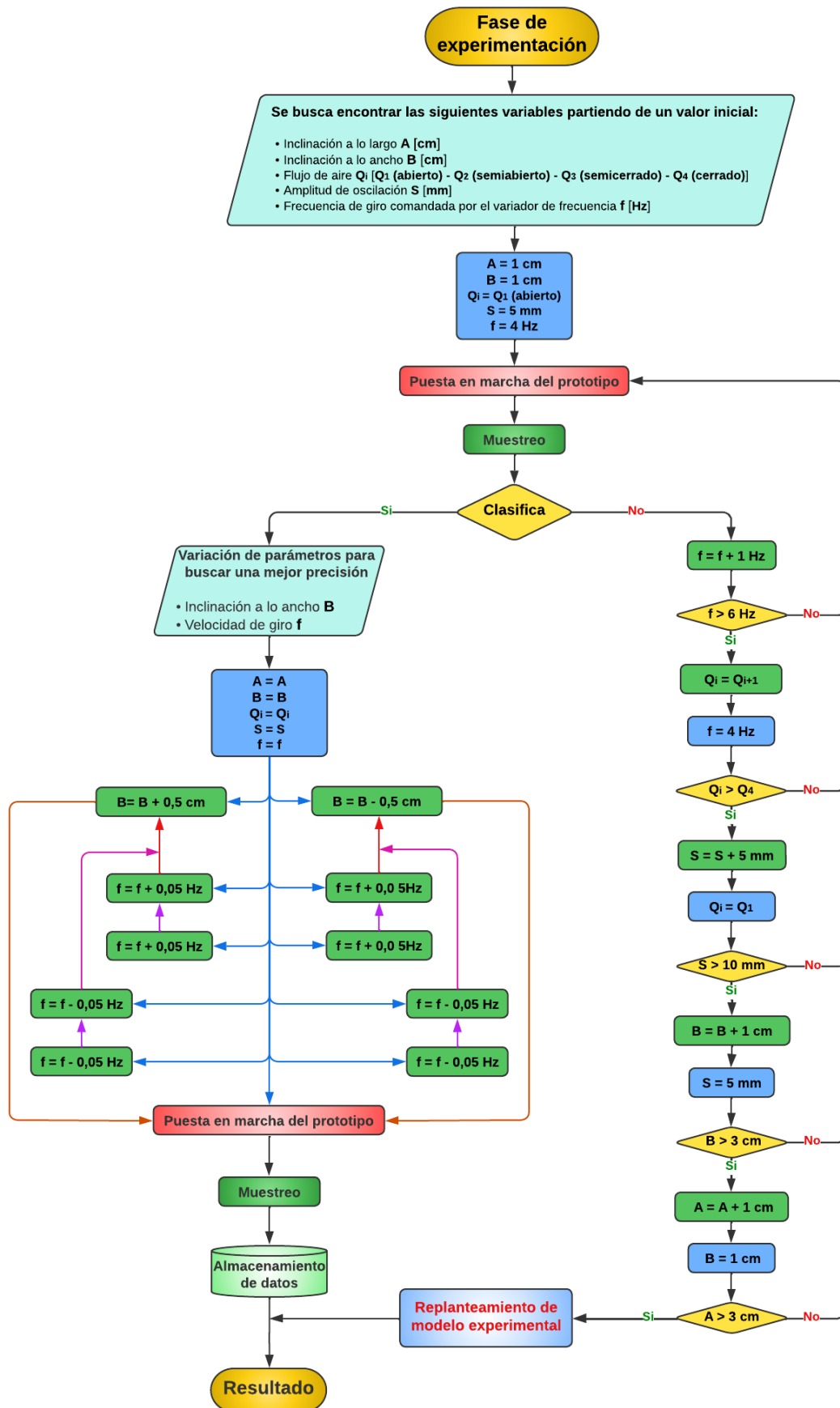


Figura 31. Proceso de búsqueda de condiciones operacionales del prototipo.
Fuente: Autor.

Detallando el procedimiento a seguir mediante un diagrama de flujo (Figura 32), se inicia la fase de experimentación con la interpretación de los parámetros operacionales que se busca encontrar, denotando con qué letras se las van a reconocer.



Figura 32. Inicio de la fase de experimentación.
Fuente: Autor.

Seguidamente (Figura 33) se ingresan las variables con su valor inicial en el cuadrado de color azul y se procede a realizar la clasificación densimétrica ejecutando la puesta en marcha del prototipo, para consecuentemente realizar un muestreo que consiste en pesar cada sección de salida de los granos de café (livianos, medios y pesados), comparar sus pesos para saber si clasifica, si no clasifica el modelo en cuestión, se realiza una serie de modificaciones en los parámetros operacionales hasta conseguir la clasificación densimétrica requerida, comenzando con el aumento de frecuencia de 1 Hz en 1 Hz hasta llegar a 6 Hz.

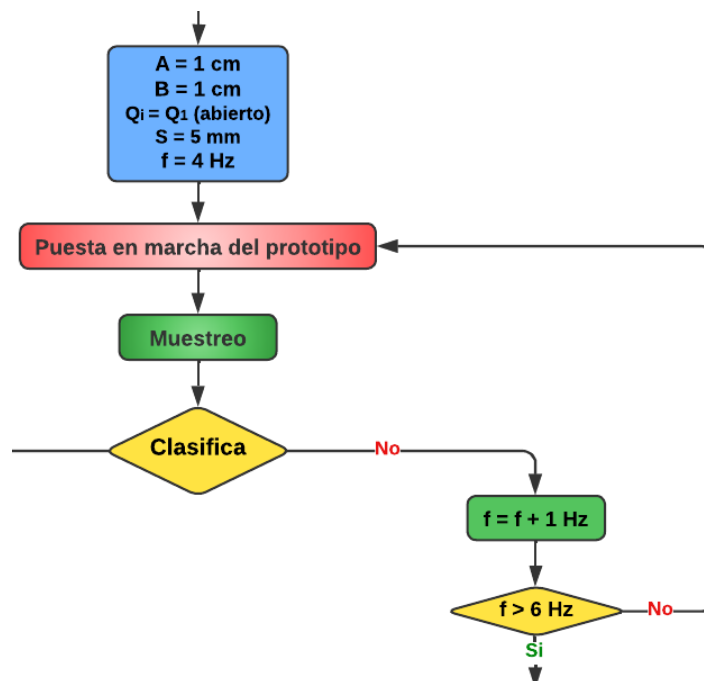


Figura 33. Búsqueda de clasificación aumentando la frecuencia f .
Fuente: Autor.

Al no haber clasificado modificando la frecuencia (Figura 34), se cambia la posición de la entrada de flujo de aire y la frecuencia se regresa a su valor inicial de 4 Hz, de esta manera hasta conseguir la posición cerrada de la escotilla de entrada de flujo de aire. Al no haber clasificado se modifica la excentricidad en 5 mm más, se regresa Q_i a su posición inicial y se repiten los anteriores procesos.

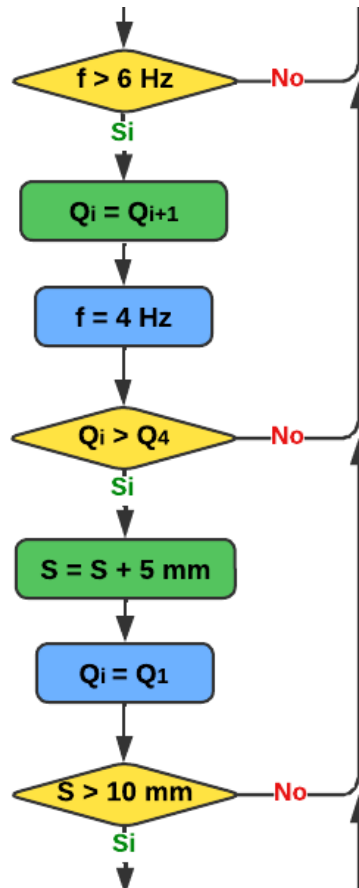


Figura 34. Búsqueda de la clasificación variando la posición Q_i y la excentricidad S .
Fuente: Autor.

Al no haber clasificado variando la excentricidad (Figura 35) se aumenta la altura de inclinación a lo ancho B de 1 cm en 1 cm y la excentricidad vuelve a su valor inicial de 5 mm y se repiten los procesos anteriores. Al llegar el valor de B a 3 cm y no conseguir clasificación, se aumenta la altura de inclinación A y se regresa a su valor inicial de B a 1 cm y nuevamente se repiten los procesos anteriores.

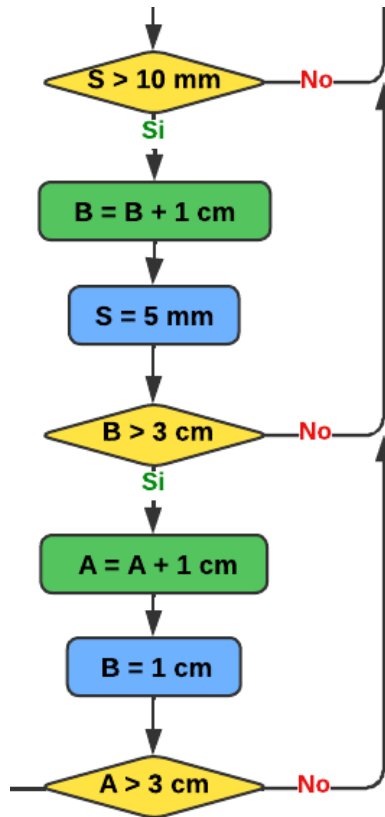


Figura 35. Búsqueda de clasificación variando respectivamente las inclinaciones B y A.
Fuente: Autor.

Si finalmente ya se varió las alturas de inclinación A (Figura 36) y no se obtuvo clasificación repitiendo los procesos anteriores, entonces se realiza un replanteamiento de modelo experimental y se finaliza el resultado.



Figura 36. Replanteamiento de modelo experimental al no haber clasificado.
Fuente: Autor.

Si en uno de los procesos antes mencionado el prototipo clasifica de forma correcta, (Figura 37) se realiza una variación en la frecuencia f y en la inclinación B para buscar una mejor precisión. Se mantienen los valores con los que se obtuvo la clasificación en el cuadrado azul.

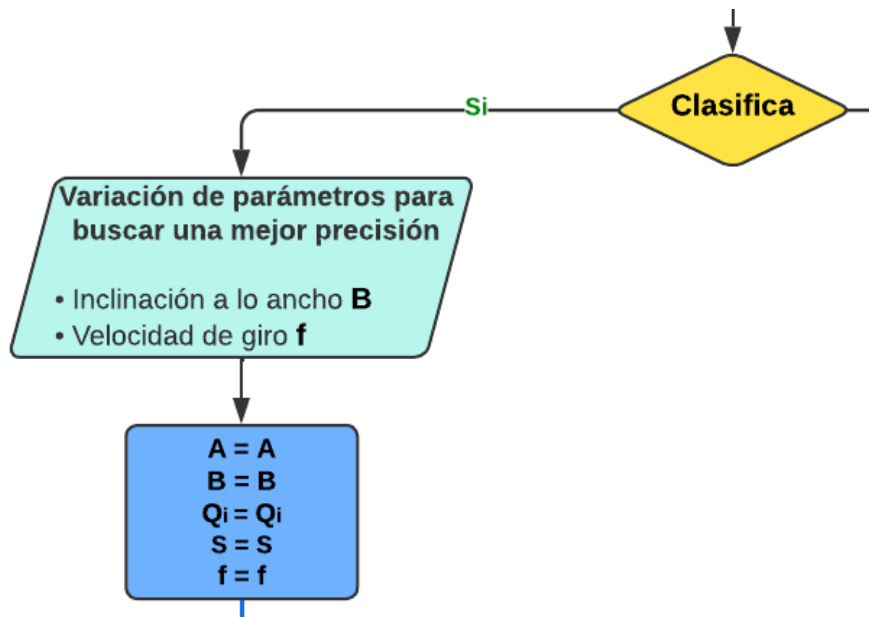


Figura 37. Variación de los parámetros B y f para buscar una mejor precisión operacional.
Fuente: Autor.

Seguidamente (Figura 38) se realiza la puesta en marcha del prototipo con el valor de clasificación encontrado y las combinaciones posibles entre la variación de altura de B (0,5 cm por encima y por debajo de su valor encontrado) con la variación de f (0,05 Hz y 0,1 Hz por encima y por debajo de su valor encontrado).

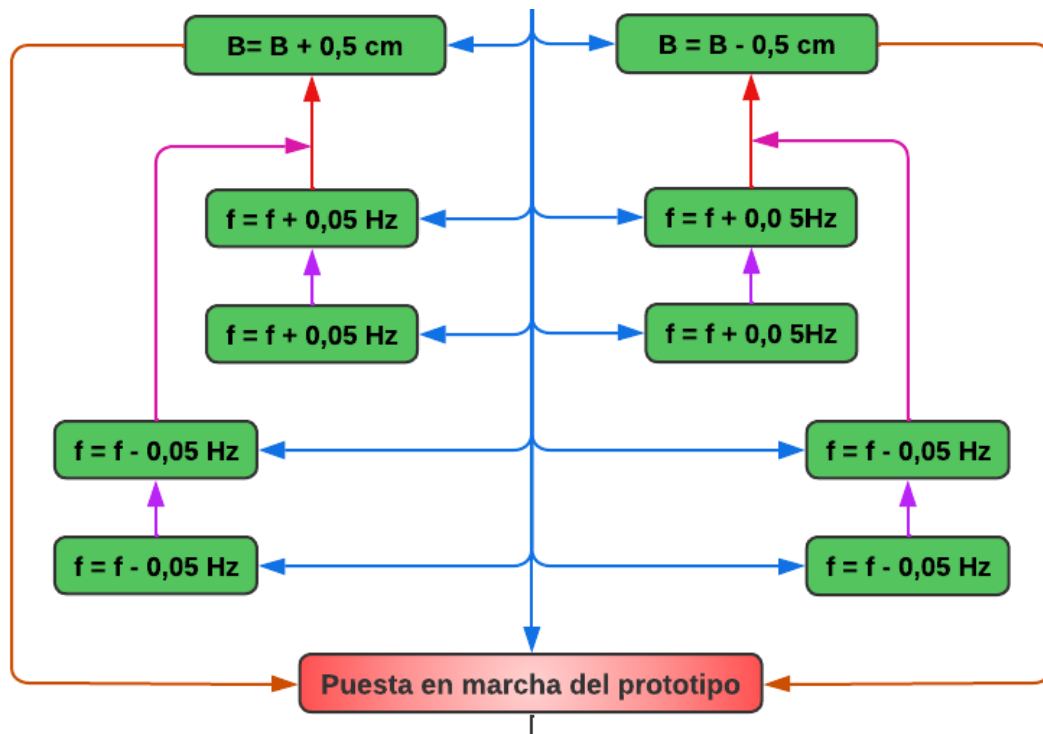


Figura 38. Puesta en marcha del prototipo con sus variaciones posibles alrededor de B y f.
Fuente: Autor.

Finalmente (Figura 39) tras cada puesta en marcha de prototipo se realiza un muestreo y se realiza el almacenamiento de datos de cada uno de los parámetros operacionales y con ello se concluye la experimentación con los resultados.

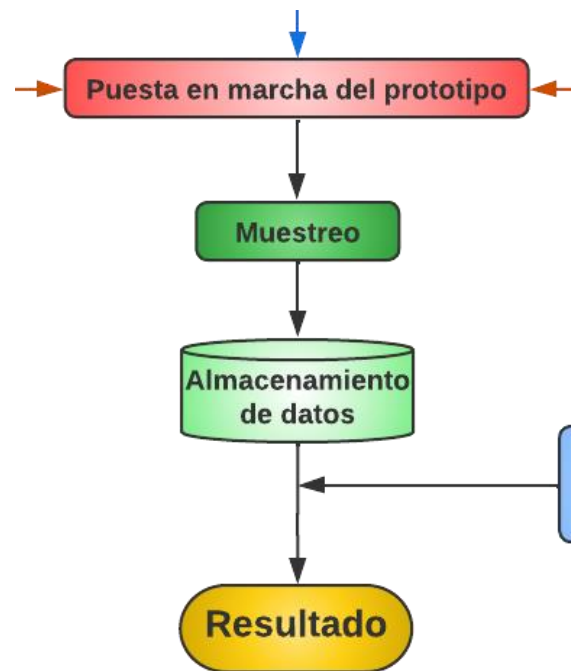


Figura 39. Almacenamiento de datos de operación según los muestreos.
Fuente: Autor.

Con relación al proceso antes descrito se obtuvo la información tabulada de los parámetros operacionales según el muestro en el Anexo 13.

6.6. Diseño de prototipo final

En este apartado se consideraron los componentes de los subsistemas, sobre los cuales se efectuaron los cálculos correspondientes, considerando las normas pertinentes en cada caso; así mismo se toman en cuenta los parámetros operacionales a raíz de la fase experimental (ver Anexo 13).

Para mejor comprensión de los componentes y sus dimensiones, el prototipo final se encuentra en el apartado del Anexo 19 (Planos).

6.6.1. Sistema de transmisión de Potencia

Este sistema (Figura 40) se define la potencia requerida para que el prototipo realice su movimiento alternante y sus componentes fundamentales son: motor, biela, eje excéntrico, volante de inercia, rodamientos y pernos de sujeción.

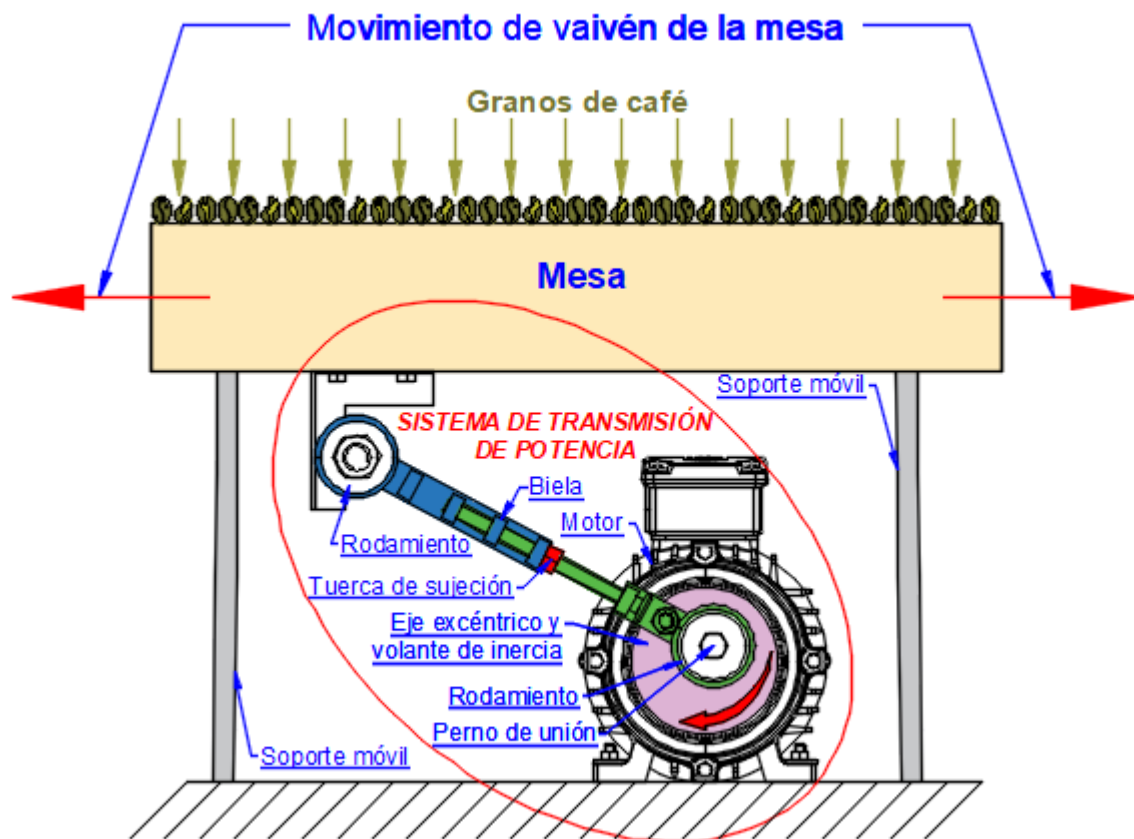


Figura 40. Sistema de transmisión de potencia.

Fuente: Autor.

Se busca obtener la potencia con la que trabaja el prototipo, mediante la sumatoria de fuerzas que se requieren para causar el movimiento (fuerza para flexionar los soportes y la fuerza de inercia para empezar el movimiento) por la velocidad lineal.

Aceleración tangencial:

Se comienza definiendo qué aceleración se requiere para vencer la inercia partiendo del reposo, sabiendo que en un cuarto del periodo la máquina realiza su primer desplazamiento de clasificación (Figura 41).

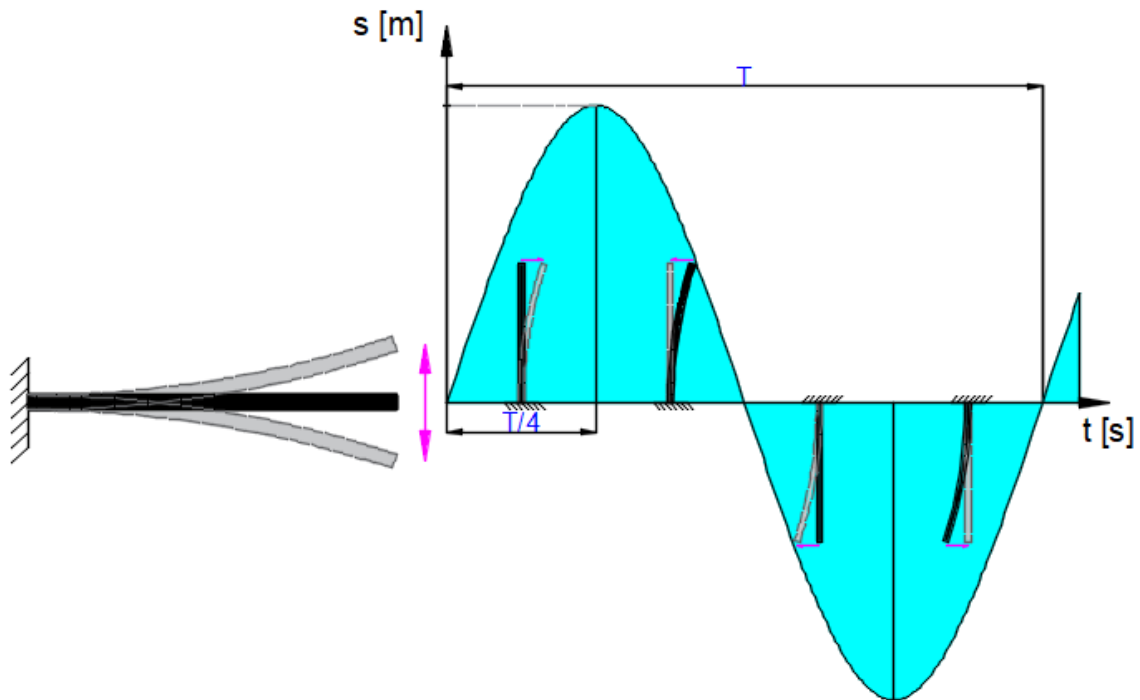


Figura 41. Esquema de periodo del movimiento del prototipo.
Fuente: Autor.

De las ecuaciones 29, 30 y 31 se determina el tiempo (periodo) en que transcurre un ciclo de clasificación. Las revoluciones conocidas mediante la fase experimental, son equivalentes a $n = 282$ rpm.

$$\omega = n * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} * \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}}$$

$$\omega = 282 \frac{\text{rev}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} * \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}}$$

$$\omega = 29,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi \text{ rad}}$$

$$f = \frac{29,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{2\pi \text{ rad}}$$

$$f = 4,7 \text{ Hz}$$

$$T = \frac{1}{f}$$

$$T = \frac{1}{4,7 \text{ Hz}}$$

$$T = 0,2127 \text{ s}$$

El tiempo en que la máquina tiene que acelerar para realizar el primer movimiento, corresponde a un cuarto del periodo encontrado, obteniendo el siguiente resultado.

$$t = \frac{T}{4}$$

$$t = \frac{0,2127 \text{ s}}{4}$$

$$t = 0,053 \text{ s}$$

La velocidad se encuentra con la ecuación 32.

$$v = \omega r$$

$$v = \left(29,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}}\right) (0,01 \text{ m})$$

$$v = 0,295 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Finalmente aplicando la ecuación 1 se puede conocer su aceleración tangencial.

$$a_t = \frac{v}{t}$$

$$a_t = \frac{0,295 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,053 \text{ s}}$$

$$a_t = 5,566 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Aceleración normal:

Se emplea la ecuación 2.

$$a_n = \frac{v^2}{r}$$

$$a_n = \frac{\left(0,295 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{0,01 \text{ m}}$$

$$a_n = 8,7 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Fuerza de inercia:

Para su cálculo, se comienza determinando la masa total que corresponde a la suma de la masa de los granos de café extendidos en la mesa (2,4 kg), más la masa de la mesa (18,4 kg) y más la masa de la biela y sus componentes (0,4 kg) (ver Figura 42), para posteriormente multiplicar con la aceleración y así obtener la fuerza de inercia.

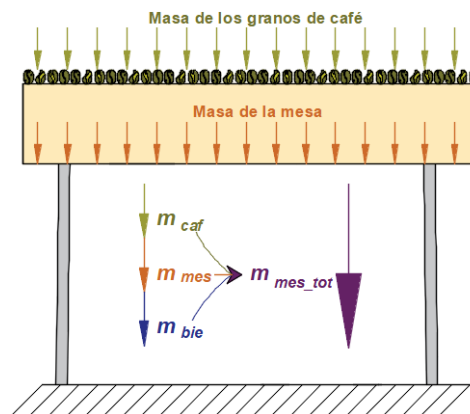


Figura 42. Masa total que actúa en la mesa.
Fuente: Autor.

$$m_{mes_tot} = m_{mes} + m_{caf} + m_{bie}$$

$$m_{mes_tot} = 18,4 \text{ kg} + 2,4 \text{ kg} + 0,4 \text{ kg}$$

$$m_{mes_tot} = 21,2 \text{ kg}$$

Teniendo en cuenta el segundo criterio del equilibrio dinámico acerca de que las dos componentes de aceleración pueden ser cero en casos especiales, se considera solo a la componente normal de la aceleración para el siguiente cálculo a partir de la ecuación 5.

$$\Sigma F = ma$$

$$F_n = m_{mes_tot} * a_n$$

$$F_n = (21,2 \text{ kg})\left(8,7 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$$

$$F_n = 184,44 \text{ N} = F_{ine}$$

Fuerza de Flexión:

Del apartado de sistema de movimiento alternante se escoge la fuerza mayor de los dos casos en la que se pueden encontrar los soportes móviles ($F_{1sop} = 3 \text{ N}$), luego se multiplica por sus 4 soportes.

$$F_{sop} = F_{1sop} * 4$$

$$F_{sop} = 3 \text{ N} * 4$$

$$F_{sop} = 12 \text{ N}$$

Sumatoria de fuerzas:

Seguidamente se suman las dos fuerzas que interactúan, obteniendo la fuerza requerida para iniciar el movimiento de la mesa.

$$F_{req} = F_{ine} + F_{sop}$$

$$F_{req} = 184,44 \text{ N} + 12 \text{ N}$$

$$F_{req} = 196,44 \text{ N}$$

La fuerza requerida en cada uno de los soportes es dividida para el número de soportes, obteniendo el siguiente resultado:

$$F_{1req} = \frac{F_{req}}{4}$$

$$F_{1req} = \frac{196,44 \text{ N}}{4}$$

$$F_{1req} = 49,11 \text{ N}$$

Potencia nominal:

Se aplica la ecuación 28.

$$Pot_{nom} = F_{req} * v$$

$$Pot_{nom} = (196,44 \text{ N})(0,295 \frac{\text{m}}{\text{s}})$$

$$Pot_{nom} = 58 \text{ W}$$

Nota: Potencia nominal máxima requerida.

Volante de inercia:

Para el volante de inercia se toma en cuenta la forma geométrica mostrada en el esquema de la Figura 43, el cual también se aprovecha para ser utilizado como eje excéntrico.

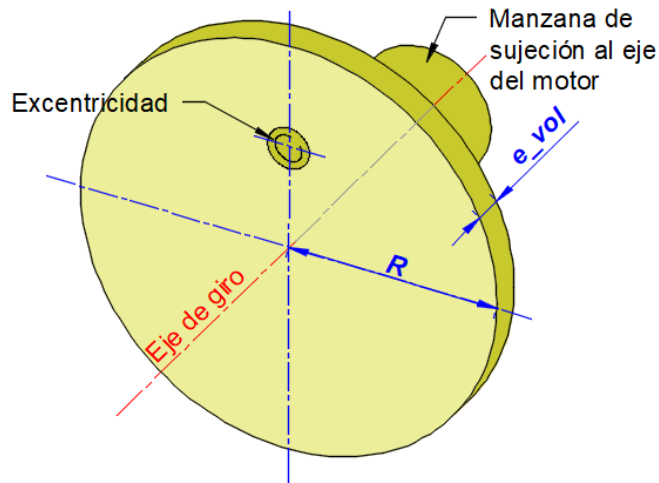


Figura 43. Esquema de la geometría del volante de inercia.
Fuente: Autor.

Siendo la potencia nominal igual a la potencia que se requiere para causar el movimiento, se utiliza la ecuación 34 con la finalidad de calcular el torque necesario.

$$M = \frac{Pot_{req}}{\omega}$$

$$M = \frac{58 \text{ W}}{29,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}$$

$$M = 2 \text{ Nm}$$

De la ecuación 35 se despeja la inercia del volante donde se utiliza el torque antes encontrado como energía cinética, ya que es la misma magnitud que se requiere para que el volante acelere (es decir: $M = 2 \text{ Nm} = Ec$).

$$Ine = \frac{2 * Ec}{\omega^2}$$

$$Ine = \frac{2 * (2 \text{ Nm})}{\left(29,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)^2}$$

$$Ine = 0,0046 \text{ kg m}^2$$

Para conocer la masa que se requiere en el volante de inercia se la despeja de la ecuación 36; se propone un radio de volante ($R = 0,07 \text{ m}$) acorde con el espacio que se tiene entre el eje del motor y su base.

$$I_{ne} = \frac{m_{vol} * R^2}{2}$$

$$m_{vol} = \frac{2 * I_{ne}}{R^2}$$

$$m_{vol} = \frac{2 * (0,0046 \text{ kg m}^4)}{(0,07 \text{ m})^2}$$

$$m_{vol} = 1,88 \text{ kg}$$

Seguidamente, utilizando la ecuación 37 se procede a calcular el volumen del volante de inercia. La densidad del acero de transmisión AISI 1018 ($\rho_{vol} = 7870 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$) se extrae en el Anexo 14.

$$V_{vol} = \frac{m_{vol}}{\rho_{vol}}$$

$$V_{vol} = \frac{1,88 \text{ kg}}{7870 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$V_{vol} = 0,000238 \text{ m}^3$$

Finalmente, empleando la ecuación 38 se conoce el espesor del volante.

$$e_{vol} = \frac{V_{vol}}{\pi R^2}$$

$$e_{vol} = \frac{0,000238 \text{ m}^3}{\pi(0,07 \text{ m})^2}$$

$$e_{vol} = 0,0156 \text{ m} \approx 16 \text{ mm}$$

Recálculo de potencia nominal por medio de la teoría de mecanismos biela-manivela-corredera:

Ya conocidas las masas de los elementos que interactúan en el movimiento del sistema de transmisión de potencia, se precisa realizar un cálculo más minucioso correspondiente a la teoría

de mecanismos biela-manivela-corredera misma que se requiere para dar movimiento a dicho sistema.

La Figura 44 muestra la posición de los elementos que se encuentran en movimiento, y en la Figura 45 se plasma más a detalle sus dimensiones.

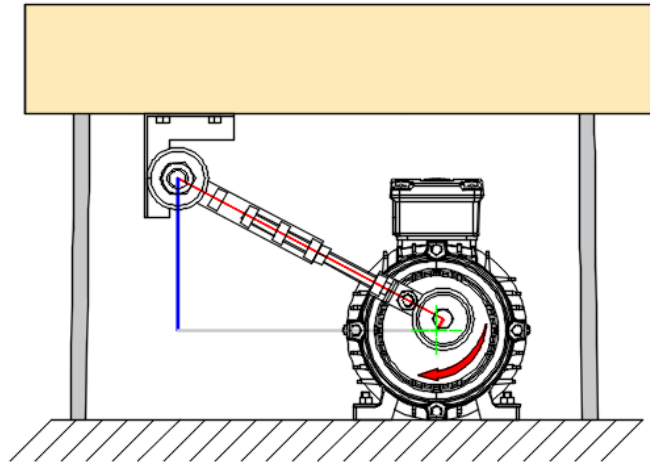


Figura 44. Posición de los elementos en movimiento.
Fuente: Autor.

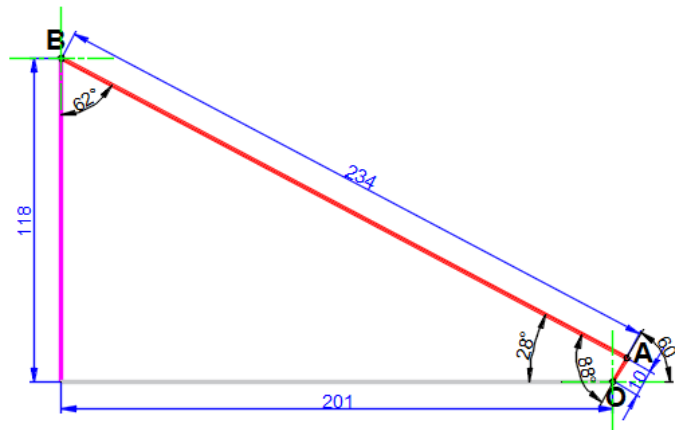


Figura 45. Dimensiones de los elementos en movimiento.
Fuente: Autor.

Las especificaciones de los elementos son las siguientes:

- $L_{OA} = 0,01 \text{ m}$
- $L_{AB} = 0,234 \text{ m}$
- $\omega_1 = 29,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$
- $k_{vel} = 0,005 \text{ m/s/mm}$
- $k_{ace} = 0,15 \text{ m/s}^2/\text{mm}$

- $\xi_1 = 0 \text{ s}^{-2}$ (ω_1 es constante)
- $m_0 = 1,88 \text{ kg}$ (volante de disco)
- $m_1 = 0,01 \text{ kg}$ (perno de sujeción pie de biela)
- $m_2 = 0,38 \text{ kg}$ (biela)
- $m_3 = 0,01 \text{ kg}$ (perno de sujeción cabeza de biela)
- $F_{res} = F_{req} - F_{bie-man} = 196,44 \text{ N} - \left(0,4 \text{ kg} * 8,7 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = 192,96 \text{ N}$

Se aplica la ecuación 32 para obtener la velocidad en el punto A (\vec{v}_A).

$$v = \omega r$$

$$\vec{v}_A = L_{AO} * \omega_1$$

$$\vec{v}_A = 0,01 \text{ m} * 29,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\vec{v}_A = 0,295 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Se dibuja el diagrama de velocidades en términos de distancias (Figura 46) con ayuda del factor k_{vel} se saca la distancia del segmento \overline{pa} usando la ecuación 46 y posteriormente obtiene las velocidades en el punto B (\vec{v}_B), en el punto B con respecto al punto A (\vec{v}_{BA}) y la velocidad angular en la biela (ω_2) utilizando las ecuaciones 47, 48 y 32, respectivamente.

$$\overline{pa} = \frac{\vec{v}_A}{k_{vel}}$$

$$\overline{pa} = \frac{0,295 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,005 \text{ m/s/mm}}$$

$$\overline{pa} = 59 \text{ mm}$$

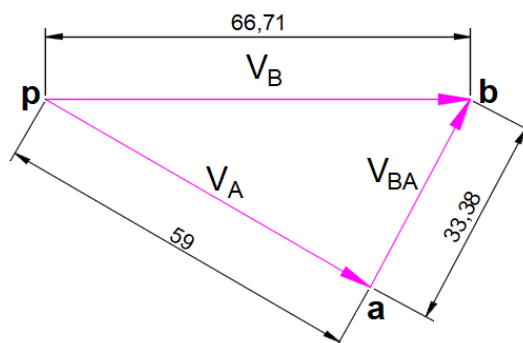


Figura 46. Diagrama de velocidad.

Fuente: Autor.

$$\vec{v}_B = \overline{pb} * k_{vel}$$

$$\vec{v}_B = 66,71 \text{ mm} * \frac{0,005 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\text{mm}}$$

$$\vec{v}_B = 0,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\vec{v}_{BA} = \overline{ab} * k_{vel}$$

$$\vec{v}_{BA} = 33,38 \text{ mm} * \frac{0,005 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\text{mm}}$$

$$\vec{v}_{BA} = 0,167 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\omega_2 = \frac{\vec{v}_{BA}}{L_{AB}}$$

$$\omega_2 = \frac{0,167 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,234 \text{ m}}$$

$$\omega_2 = 0,71 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Se aplica la ecuación 49 y 50 para obtenerla aceleración normal en el punto A ($\overline{a^n}_A$).

$$\overline{a^n}_A = L_{OA} * \omega_1$$

$$\overline{a^n}_A = 0,01 \text{ m} * \left(29,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}\right)^2$$

$$\overline{a^n}_A = 8,7 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\overline{a^n}_{BA} = \frac{\vec{v}_{BA}^2}{L_{AB}}$$

$$\overline{a^n}_{BA} = \frac{\left(0,167 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{0,234 \text{ m}}$$

$$\overline{a^n}_{BA} = 0,119 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Se dibuja el diagrama de aceleraciones en términos de distancias (Figura 47), seguidamente con ayuda del factor k_{ace} se calcula la distancia del segmento $\overline{p'a'}$ y $\overline{a'b''}$ para posteriormente obtener \vec{a}_{BA}^t , \vec{a}_B , y con la ecuación 51 se encuentra aceleración angular en la biela ξ_2 .

$$\overline{p'a'} = \frac{\overline{a_{OA}^n}}{k_{ace}}$$

$$\overline{p'a'} = \frac{8,7 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{0,15 \text{ m/s}^2/\text{mm}}$$

$$\overline{p'a'} = 58 \text{ mm}$$

$$\overline{a'b''} = \frac{\overline{a_{BA}^n}}{k_{ace}}$$

$$\overline{a'b''} = \frac{0,119 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{0,15 \text{ m/s}^2/\text{mm}}$$

$$\overline{a'b''} = 0,79 \text{ mm}$$

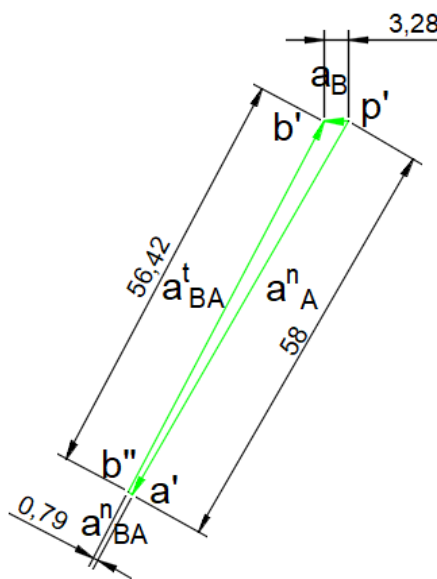


Figura 47. Diagrama de aceleraciones.
Fuente: Autor.

$$\vec{a}_{BA}^t = \overline{b'b''} * k_{ace}$$

$$\vec{a}_{BA}^t = 56,42 \text{ mm} * \frac{0,15 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\text{mm}}$$

$$\vec{a}_{BA}^t = 8,46 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\vec{a}_B = \overline{p'b'} * k_{ace}$$

$$\vec{a}_B = 3,28 \text{ mm} * \frac{0,15 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\text{mm}}$$

$$\vec{a}_B = 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\xi_2 = \frac{\vec{a}_{BA}^t}{L_{AB}}$$

$$\xi_2 = \frac{8,46 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{0,234 \text{ m}}$$

$$\xi_2 = 36,15 \text{ s}^{-2}$$

Seguidamente se obtienen los valores de peso de cada elemento.

$$G_0 = m_0 * g$$

$$G_0 = 1,88 \text{ kg} * 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$G_0 = 18,44 \text{ N}$$

$$G_1 = m_1 * g$$

$$G_1 = 0,01 \text{ kg} * 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$G_1 = 0,0981 \text{ N}$$

$$G_2 = m_2 * g$$

$$G_2 = 0,38 \text{ kg} * 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$G_2 = 3,73 \text{ N}$$

$$G_3 = m_3 * g$$

$$G_3 = 0,01 \text{ kg} * 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$G_3 = 0,0981 \text{ N}$$

Se extraen las aceleraciones multiplicando el factor k_{ace} en los puntos donde se encuentran los centros de masa de cada elemento, cuyos valores son expresados en la Figura 48.

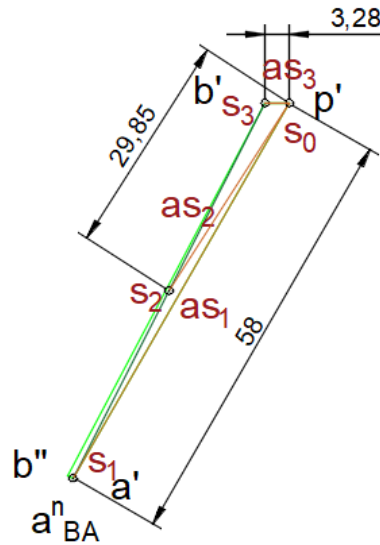


Figura 48. Diagrama de aceleraciones en los centros de masa.
Fuente: Autor.

$$as_0 = s_0 * k_{ace}$$

$$as_0 = 0 \text{ mm} * 0,15 \text{ m/s}^2/\text{mm}$$

$$as_0 = 0 \text{ m/s}^2$$

$$as_1 = s_1 * k_{ace}$$

$$as_1 = 58 \text{ mm} * 0,15 \text{ m/s}^2/\text{mm}$$

$$as_1 = 8,7 \text{ m/s}^2$$

$$as_2 = s_2 * k_{ace}$$

$$as_2 = 29,85 \text{ mm} * 0,15 \text{ m/s}^2/\text{mm}$$

$$as_2 = 4,48 \text{ m/s}^2$$

$$as_3 = s_3 * k_{ace}$$

$$as_3 = 3,28 \text{ mm} * 0,15 \text{ m/s}^2/\text{mm}$$

$$as_3 = 0,5 \text{ m/s}^2$$

Conocida la aceleración de cada centro de masa se procede a calcular la fuerza de inercia de cada elemento.

$$F_{in0} = m_0 * a s_0$$

$$F_{in0} = 1,88 \text{ kg} * 0 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_{in0} = 0 \text{ N}$$

$$F_{in1} = m_1 * a s_1$$

$$F_{in1} = 0,01 \text{ kg} * 8,7 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_{in1} = 0,087 \text{ N}$$

$$F_{in2} = m_2 * a s_2$$

$$F_{in2} = 0,38 \text{ kg} * 4,48 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_{in2} = 1,7 \text{ N}$$

$$F_{in3} = m_3 * a s_3$$

$$F_{in3} = 0,01 \text{ kg} * 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_{in3} = 0,005 \text{ N}$$

Seguidamente, se calcula el momento de inercia en cada elemento, donde la aceleración angular en el primer tramo de movimiento (eje móvil) $\xi_1 = 0 \text{ s}^{-2}$ abarca a la m_0 y m_1 por girar juntos, la aceleración angular en el segundo tramo de movimiento (biela) $\xi_2 = 36,15 \text{ s}^{-2}$ se considera la masa de la biela (m_2) y para la aceleración en el último tramo de movimiento (corredera) $\xi_3 = 0 \text{ s}^{-2}$; debido a que el elemento solo se traslada, existe únicamente momento de inercia en la biela (M_{in2}), en cual se calcula con la ecuación 52, donde se considera a la biela como una varilla (Anexo 6) .

$$M_{in2} = I n e_2 * \xi_2$$

$$M_{in2} = \frac{m_2 * L_{AB}^2}{12} * \xi_2$$

$$M_{in2} = \frac{0,38 \text{ kg} * (0,234 \text{ m})^2}{12} * 36,15 \text{ s}^{-2}$$

$$M_{in2} = 0,063 \text{ Nm} = 63 \text{ Nmm}$$

Seguidamente, se busca la fuerza equilibrante ($P_{eq.}$) mostrado en la Figura 49 utilizando el teorema de Zhukovski que implica girar 90° el diagrama de velocidades, obteniendo un resultado de distribución mostrado en la Figura 50.

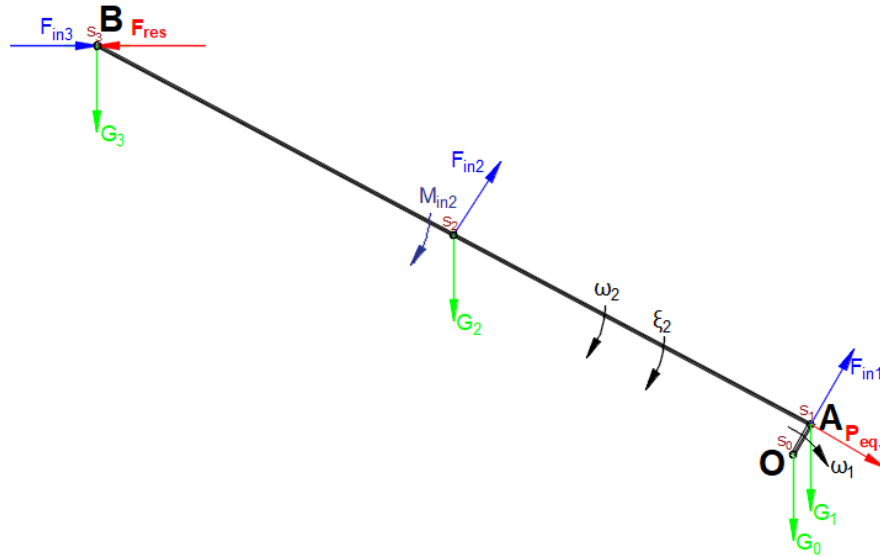


Figura 49. Distribución de fuerzas del sistema biela-manivela-corredera.
Fuente: Autor.

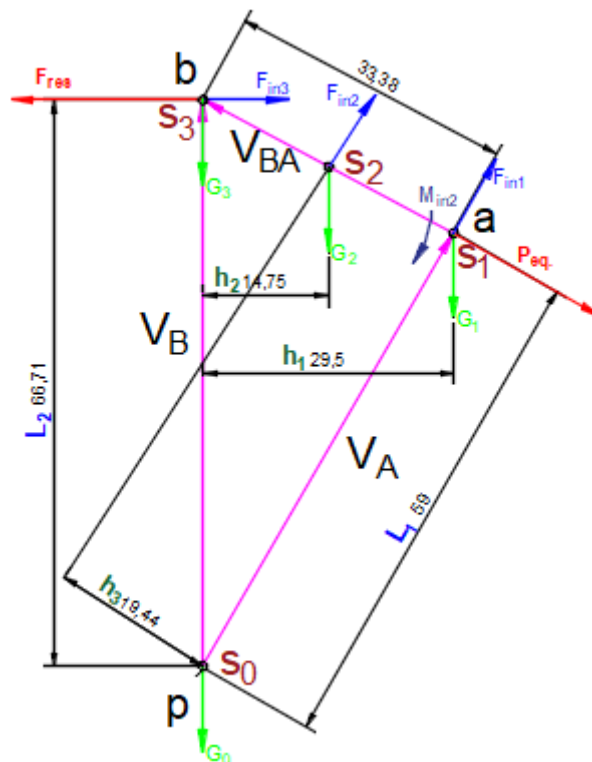


Figura 50. Teorema de Zhukovski en el sistema biela-manivela-corredera.
Fuente: Autor.

Para extraer la fuerza equivalente ($P_{eq.}$) se realiza la sumatoria de momentos con respecto al punto p de la Figura 50.

$$+\cup \sum M_p = 0$$

$$-P_{eq.} * L_1 + F_{res} * L_2 - M_{in2} - F_{in2} * h_3 - F_{in3} * L_2 - G_1 * h_1 - G_2 * h_2 = 0$$

$$P_{eq.} = \frac{F_{res} * L_2 - M_{in2} - F_{in2} * h_3 - F_{in3} * L_2 - G_1 * h_1 - G_2 * h_2}{L_1}$$

$$P_{eq.} = - \frac{192,96 \text{ N} * 66,71 \text{ mm} - 63 \text{ Nmm} - 1,7 \text{ N} * 19,44 \text{ mm} - 0,005 \text{ N} * 66,71 \text{ mm} - 0,0981 \text{ N} * 29,5 \text{ mm} - 3,73 \text{ N} * 14,75 \text{ mm}}{59 \text{ mm}}$$

$$P_{eq.} = 215,5 \text{ N}$$

Se calcula el momento equivalente utilizando la ecuación 53.

$$M_{eq.} = P_{eq.} * L_{OA}$$

$$M_{eq.} = 215,5 \text{ N} * 0,01 \text{ m}$$

$$M_{eq.} = 2,15 \text{ Nm}$$

Y finalmente, la potencia equivalente que se requiere para hacer girar el sistema donde se emplea la ecuación 27.

$$Pot_{eq.} = M_{eq.} * \omega_1$$

$$Pot_{eq.} = 2,15 \text{ Nm} * 29,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$Pot_{eq.} = 64 \text{ W}$$

Tras la obtención de la nueva potencia nominal ($Pot_{eq.} = 64 \text{ W}$), se renuevan los siguientes parámetros:

- $F_{req} = 215,5 \text{ N}$
- $F_{1req} = 53,875 \text{ N}$
- $Pot_{nom} = 64 \text{ W}$
- $M = 2,15 \text{ Nm}$
- $m_{vol} = 2 \text{ kg}$
- $e_{vol} = 17 \text{ mm}$

Tiempo de vida útil de rodamientos:

Se implementaron dos rodamientos de bolas de la serie 6203Z para la biela (en la cabeza y el pie). El movimiento de la biela solo realiza fuerza radial, por lo tanto, la fuerza axial sobre el rodamiento es cero (Ver Anexo 7 para el análisis de los factores radiales y axiales).

$$\frac{F_a}{F_r} = \frac{0 \text{ N}}{215,5 \text{ N}} = 0$$

$$\frac{F_r}{F_a} = \frac{215,5 \text{ N}}{0 \text{ N}} = \infty$$

$$X = 1$$

$$Y = 0$$

Se utiliza la ecuación 41 para la carga dinámica equivalente.

$$P = X * F_r + Y * F_a$$

$$P = 1 * (215,5 \text{ N}) + 0 * 0 \text{ N}$$

$$P = 215,5 \text{ N}$$

Ver Anexo 7 para obtener la capacidad dinámica del rodamiento 6203.

$$C = 9500 \text{ N}$$

Para la vida nominal en millones de revoluciones de aplica la ecuación 39.

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^3$$

$$L_{10} = \left(\frac{9500 \text{ N}}{215,5 \text{ N}}\right)^3$$

$$L_{10} = 85670 * 10^6 \text{ rev}$$

La vida útil en horas está dada por la ecuación 40.

$$L_{h10} = \frac{L_{10} * 10^6}{n * 60}$$

$$L_{h10} = \frac{85670 * 10^6 \text{ rev}}{282 \frac{\text{rev}}{\text{min}} * 60}$$

$$L_{h10} = 5063238 \text{ h}$$

Esfuerzos en la biela:

El cuerpo de la biela consiste de un perno de 3/8 de pulgada UNC grado SAE 2, ajustado con una tuerca de 8 mm de alto (permitiendo que haya contacto en 5 hilos), mismo que se encuentra en conexión no permanente con una tuerca de sujeción para su regulación de longitud (Figura 51 y 52).

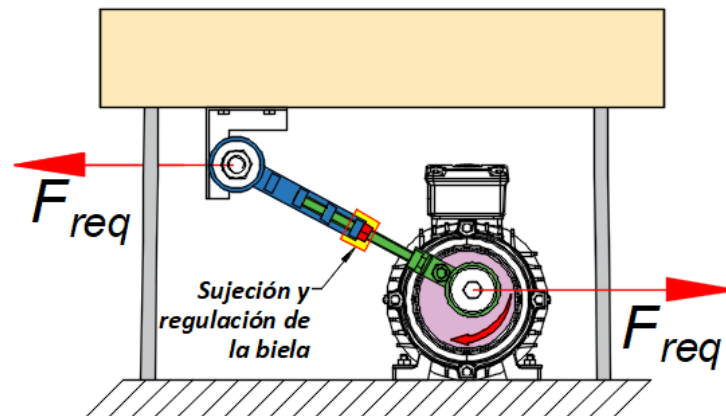


Figura 51. Sujeción y regulación de la biela.

Fuente: Autor.

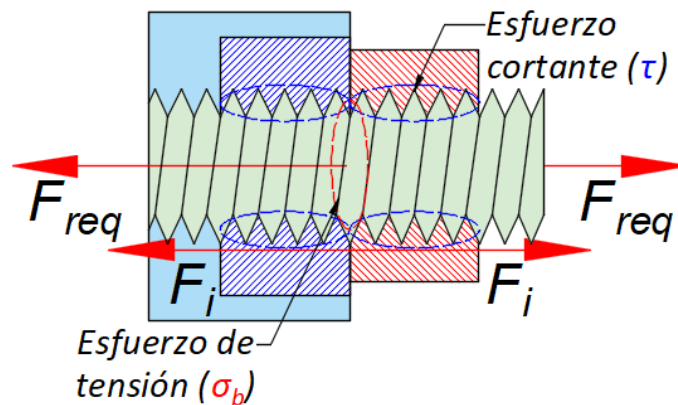


Figura 52. Esfuerzos en la sujeción y regulación de la biela.

Fuente: Autor.

Las características del perno y especificaciones se encuentran en el Anexo 8, donde:

- $A_t = 0.0775 \text{ in}^2 = 4,99999 \times 10^{-5} \text{ m}^2$
- $S_p = 55 \text{ kpsi} = 379,1 \text{ MPa}$
- $A_r = 0.0678 \text{ in}^2 = 4,374 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ y si equivalente de diámetro menor es $d_r = 7,46 \times 10^{-3} \text{ m}$
- $n_t = 5$

- $p = 16$ en una pulgada, y el equivalente en el sistema internacional es de $1,5875 * 10^{-3}$ m

Para el esfuerzo cortante en el perno (τ_{cur_bie}) (Figura 53), se utiliza la ecuación 42 en la cual se reemplazan las ecuaciones 43 y 44 de la precarga y carga de prueba (F_i y F_p).

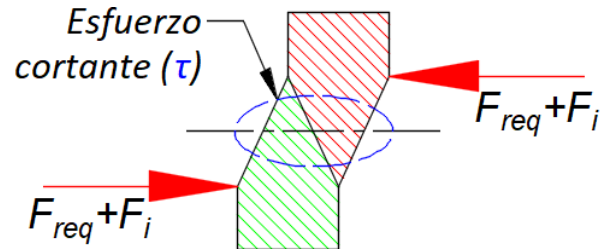


Figura 53. Esfuerzo cortante en la rosca del perno.
Fuente: Autor.

$$F_p = A_t * S_p$$

$$F_p = (4,99999 * 10^{-5} \text{ m}^2)(379,1 \text{ MPa})$$

$$F_p = 18955 \text{ N}$$

$$F_i = 0,75 * F_p$$

$$F_i = 14216,2 \text{ N}$$

$$\tau = \frac{3 * (F + F_i)}{\pi * d_r * n_t * p}$$

$$\tau_{cur_bie} = \frac{3 * (F_{req} + F_i)}{\pi * d_r * n_t * p}$$

$$\tau_{cur_bie} = \frac{3 * (215,5 \text{ N} + 14216,2 \text{ N})}{\pi * (7,46 * 10^{-3} \text{ m}) * (5) * (1,5875 * 10^{-3} \text{ m})}$$

$$\tau_{cur_bie} = 232,7 \text{ MPa}$$

Para el esfuerzo a la tensión del perno (σ_b) (Figura 54), se utiliza la ecuación 45, considerando la fuerza requerida para realizar el movimiento.

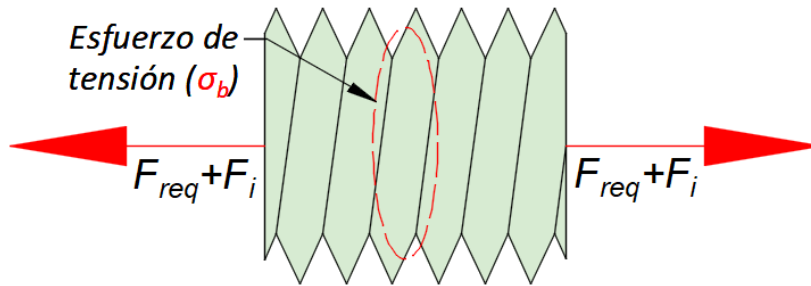


Figura 54. Esfuerzo de tensión del perno.

Fuente: Autor.

$$\sigma_b = \frac{F_{req} + F_i}{A_t}$$

$$\sigma_b = \frac{215,5 \text{ N} + 14216,2 \text{ N}}{4,99999 * 10^{-5} \text{ m}^2}$$

$$\sigma_b = 288,63 \text{ MPa}$$

Teniendo en cuenta que la resistencia mínima de fluencia del perno de grado 2 (ver Anexo 8) es equivalente a 55 kpsi (379,1 MPa), implementando la ecuación 25 se conoce su factor de seguridad para el esfuerzo cortante transversal y el esfuerzo a la tensión respectivamente.

$$n_s = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{dis}}$$

$$n_s = \frac{\sigma_{adm}}{\tau_{cur_bie}}$$

$$n_s = \frac{379,1 \text{ MPa}}{232,7 \text{ MPa}}$$

$$n_s = 1,63$$

$$n_s = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_b}$$

$$n_s = \frac{379,1 \text{ MPa}}{288,63 \text{ MPa}}$$

$$n_s = 1,31$$

Esfuerzo cortante en los pernos que sujetan la cabeza y pie de la biela:

Para la sujeción de la cabeza y pie de la biela se consideró un perno de 3/8 de pulgada UNC grado SAE 2, sobre este actúa la fuerza requerida para dar el movimiento a la mesa.

A continuación, se muestra como se involucra el perno anteriormente mencionado (Figura 55 y 56).

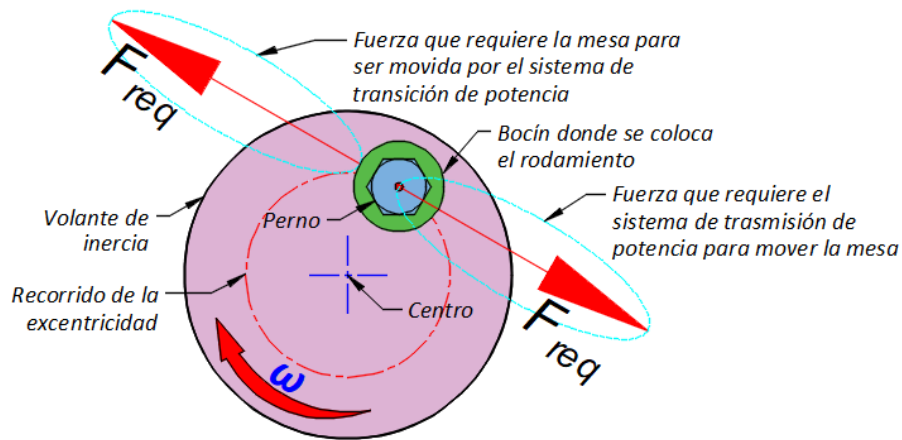


Figura 55. Interacción de la fuerza requerida en el perno de sujeción de la biela.
Fuente: Autor.

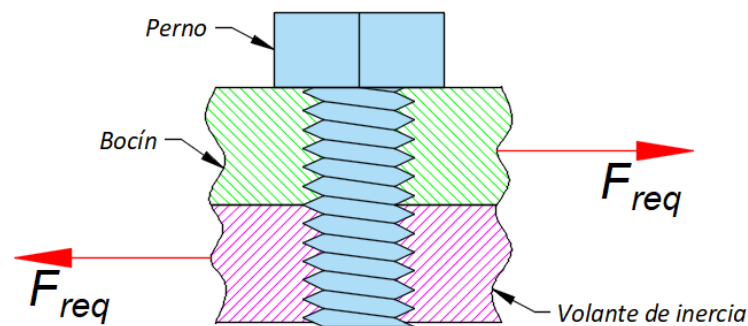


Figura 56. Perno de sujeción de la biela sometido al corte.
Fuente: Autor.

La ecuación 8 es empleada para conocer el esfuerzo cortante que resisten estos pernos tanto en la cabeza como en el pie de la biela ($\tau_{(c,p)_{bie}}$). Ver Anexo 8 para conocer el área del diámetro menor del perno.

- $A_r = 0.0678 \text{ in}^2 = 4,374 * 10^{-5} \text{ m}^2$.

$$\tau = \frac{F}{B}$$

$$\tau_{(c,p)_{bie}} = \frac{F_{req}}{A_r}$$

$$\tau_{(c,p)_{bie}} = \frac{215,5 \text{ N}}{4,374 * 10^{-5} \text{ m}^2}$$

$$\tau_{(c,p)_{bie}} = 4,93 \text{ MPa}$$

El valor de esfuerzo cortante en los pernos estas muy por debajo del esfuerzo admisible del perno $S_p = 55 \text{ kpsi} = 379,1 \text{ MPa}$.

Potencia de diseño:

Primeramente, se obtuvo el factor de servicio mediante las condiciones de trabajo del motor con base en los parámetros del Anexo 5.

$$f_s = 1,2 \left\{ \begin{array}{l} \text{—Es una máquina de movimiento de carga ligera} \\ \text{—El motor eléctrico de altas revoluciones (bajo par)} \\ \text{—Sus jornadas de trabajo no superan las } 16 \frac{\text{h}}{\text{día}} \end{array} \right.$$

Seguidamente, para determinar el factor de seguridad se utiliza la ecuación 26, según el método de Pugsley del Anexo 4

$$n_{sx} = 1,2 \left\{ \begin{array}{l} \text{—La calidad de los materiales, mano de obra, mantenimiento} \\ \text{e inspección (A: muy bien)} \\ \text{—El control de la carga aplicada a la parte (B: muy bien)} \\ \text{—La exactitud del análisis de esfuerzos, información experimental} \\ \text{o experiencia con dispositivos similares (C: bien)} \end{array} \right.$$

$$n_{sy} = 1,2 \left\{ \begin{array}{l} \text{—El peligro para el personal (D: no serio)} \\ \text{—El impacto económico (E: muy serio)} \end{array} \right.$$

$$n_s = n_{sx} n_{sy}$$

$$n_s = (1,2)(1,2)$$

$$n_s = 1,44$$

Finalmente, la ecuación 33 da a conocer la potencia de diseño que requiere el prototipo.

$$Pot_{dis} = Pot_{nom} * f_s * n_s$$

$$Pot_{dis} = 64 \text{ W} * 1,2 * 1,44$$

$$Pot_{dis} = 110,6 \text{ W}$$

Potencia del motor seleccionado:

Para saber si la potencia del motor ($Pot_{mot} = 746 \text{ W}$) que se usa para el movimiento de la máquina es la adecuada (motor que se utiliza por motivo de insolvencia económica), se realizó un análisis donde se toman en cuenta los parámetros de torque de arranque y nominal en placa ($M_a = 5,3 \text{ Nm}$ y $M_n = 2,15 \text{ Nm}$) (Ver Anexo 16).

En la potencia de diseño se considera la potencia nominal que se multiplica por el factor de servicio y factor de seguridad, sin embargo, la potencia nominal hace referencia a la suma de fuerzas que se requieren para iniciar el movimiento (fuerza para vencer la inercia y fuerza para flexionar los soportes), una vez ya vencido el movimiento, la fuerza de inercia tiende a reducirse a cero, haciendo que se requiera menos potencia.

Teniendo en cuenta el análisis antes mencionado se puede expresar la potencia de diseño en términos de torque donde se considera el torque de arranque de la placa; la fuerza con la que se flexionan los soportes se la multiplica por la distancia a la cual se flexionan y junto con el factor de servicio y el de seguridad, se calcula el torque de trabajo. Por consiguiente, se determina el torque de diseño y torque de trabajo de la máquina (M_{dis} y M_{tra}) respectivamente:

$$M_{dis} = \frac{Pot_{dis}}{\omega}$$

$$M_{dis} = \frac{110,6 \text{ W}}{29,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}$$

$$M_{dis} = 3,7 \text{ Nm}$$

$$M_{tra} = F_{sop} * S * f_s * n_s$$

$$M_{tra} = (12 \text{ N})(0,01 \text{ m})(1,2)(1,44)$$

$$M_{tra} = 0,2 \text{ Nm}$$

Para finalizar, se calculó el factor de seguridad al cual está sometido el torque de arranque y el nominal del motor como se muestra a continuación respectivamente.

$$n_s = \frac{M_a}{M_{dis}}$$

$$n_s = \frac{5,3 \text{ Nm}}{3,7 \text{ Nm}}$$

$$n_s = 1,4$$

$$n_s = \frac{M_n}{M_{tra}}$$

$$n_s = \frac{2,15 \text{ Nm}}{0,2 \text{ Nm}}$$

$$n_s = 10,75$$

Se puede concluir que el motor utilizado es el adecuado, ya que el factor de seguridad con respecto al torque de arranque se encuentra por encima de lo que se requiere. Sin embargo, la potencia de diseño ($Pot_{dis} = 110,6 \text{ W}$) está muy por debajo de la potencia del motor ($Pot_{mot} = 746 \text{ W}$), es decir la potencia del motor esta sobredimensionada 6,75 veces más de lo requerido, es por ello que se sugiere seleccionar un motor más ajustado a los requerimientos, pero considerando los torques de diseño y trabajo anteriormente mencionados.

Por cuestiones de toque resulta favorable un motor Weg octopolar de $Pot_{mot_sug} = 180 \text{ W}$ con un torque de arranque $M_{a_mot_sug} = 4,04 \text{ Nm}$ y torque nominal de $M_{n_mot_sug} = 2,02 \text{ Nm}$ (Ver Anexo 16). Con estas adecuaciones el factor de seguridad con respecto al torque de diseño y de trabajo se ajustan.

$$n_s = \frac{M_{a_mot_sug}}{M_{dis}}$$

$$n_s = \frac{4,04 \text{ Nm}}{3,7 \text{ Nm}}$$

$$n_s = 1,09$$

$$n_s = \frac{M_{n_mot_sug}}{M_{tra}}$$

$$n_s = \frac{2,02 \text{ Nm}}{0,2 \text{ Nm}}$$

$$n_s = 10,1$$

De esta manera se concluye expresando una menor potencia para realizar un mismo trabajo; la potencia del motor sugerido tiene 0,6 de potencia extra. Es decir que la potencia aprovechada del motor sugerido es de un 61 %, en cambio, la potencia que entrega el motor utilizado en el prototipo es de un 15 % del valor de placa.

6.6.2. Sistema de generación de aire

Para la implementación del sistema de generación de aire se utilizó un soplante de fragua Blower de 550 W (de 4" de diámetro de salida de aire) el cual con la compuerta abierta por la mitad permitió obtener el flujo de aire de $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$ (su velocidad de flujo de aire es de $1,7 \text{ m/s}$) obtenido anteriormente en la fase experimental (ver Anexo 13) mismo valor que es requerido

en los agujeros de la mesa; su selección es conveniente debido a que cuenta con un adicional de abertura de escotilla de entrada de aire para posibles grupos de granos grandes de café. El modelo y especificaciones técnicas de la placa del soplante, así como también los demás accesorios se encuentran en el Anexo 17.

Este sistema hace que el flujo de aire que provee el soplante se dirija por medio de conductos a la mesa y con ello sus agujeros donde se dispersan los granos de café (Figura 57).

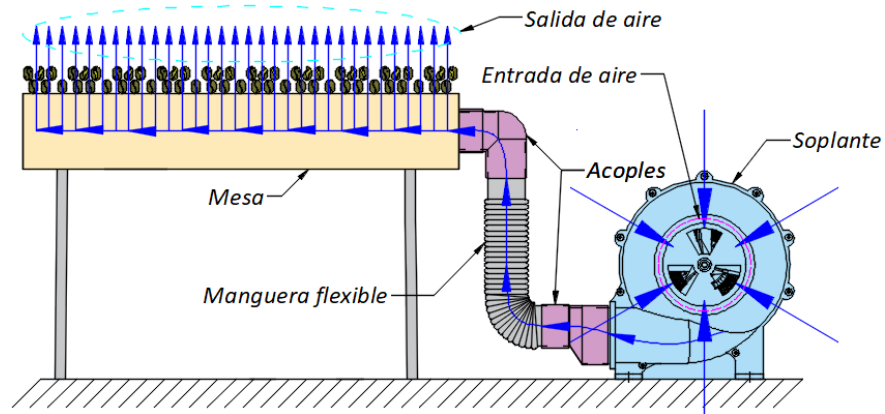


Figura 57. Sistema de generación de aire.
Fuente: Autor.

6.6.3. Sistema de movimiento alternante

El enfoque de este sistema va dirigido hacia los esfuerzos y movimientos que experimentan los soportes móviles (Figura 58), para ello se evalúa su geometría (Figura 59) junto al material propuesto como el acero inoxidable AISI 304.



Figura 58. Sistema de movimiento alternante.
Fuente: Autor.

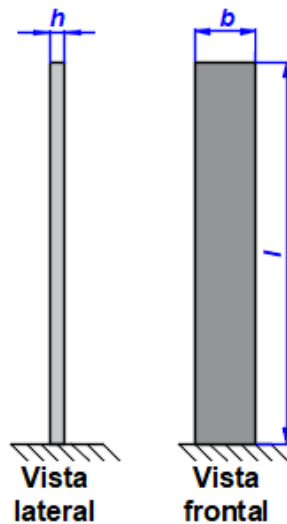


Figura 59. Geometría de soportes móviles.
Fuente: Autor.

En los soportes se evalúan dos casos; el primero (Figura 60.a), cuando se parte de un estado en el que no ocurre flexión y el segundo (Figura 60.b), cuando se parte de la posición final de flexión.

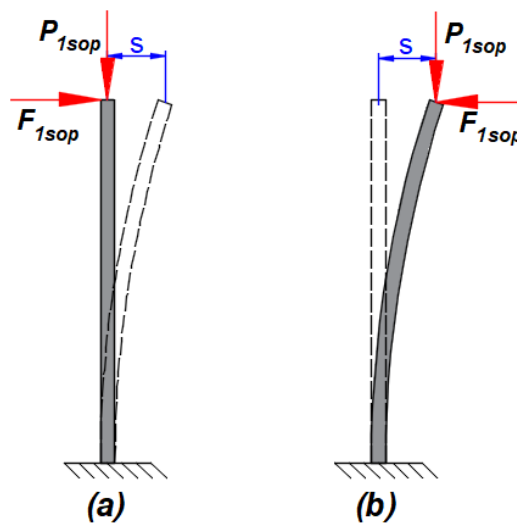


Figura 60. Soporte sin flexión (a) y soporte con flexión (b).
Fuente: Autor.

Se empieza determinando el valor del momento rectangular de inercia del soporte de las siguientes medidas $b = 0,05 \text{ m}$, $h = 0,004 \text{ m}$ y $l = 0,268 \text{ m}$ (ecuación 10).

$$I = \frac{bh^3}{12}$$

$$I = \frac{(0,05 \text{ m})(0,004 \text{ m})^3}{12}$$

$$I = 2,667 * 10^{-10} \text{ m}^4$$

Seguidamente, se determina el peso que actúa en los soportes utilizando la ecuación 4, para ello se considera la masa de la mesa y del café ya conocidas, para posteriormente multiplicar por la gravedad.

$$P = mg$$

$$P = m_{mes_tot} * g$$

$$P = (21,2 \text{ kg}) \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$$

$$P = 208 \text{ N}$$

Para conocer el peso que admite un solo soporte, se divide el anterior valor del peso total para los 4 soportes que tiene la mesa, teniendo como resultado lo siguiente.

$$P_{1sop} = \frac{P}{4}$$

$$P_{1sop} = \frac{208 \text{ N}}{4}$$

$$P_{1sop} = 52 \text{ N}$$

Para el esfuerzo a la flexión visto en el caso de la Figura 60.a se utiliza la ecuación 11; debido a que es una carga en voladizo y se busca conocer la magnitud de fuerza necesaria para tal desplazamiento, se despeja dicha fuerza equivalente a un soporte. En cambio, la fuerza del caso basado en la Figura 60.b se utiliza la ecuación 12 donde se despeja la fuerza. El coeficiente de elasticidad del material AISI 304 es de $E = 176 \text{ MPa}$.

Fuerza de un soporte en el caso de la Figura 60.a:

$$El^3 = \frac{Fl^3}{3}$$

$$F_{1sop} = \frac{3El^3}{l^3}$$

$$F_{1sop} = \frac{3 \left(176000000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right) (2,667 * 10^{-10} \text{ m}^4) (0,01 \text{ m})}{(0,268 \text{ m})^3}$$

$$F_{1sop} = 0,07315 \text{ N}$$

Fuerza de un soporte en el caso de la Figura 60.b:

$$EIs = \frac{Fl^3}{3} - \frac{Psl^2}{2}$$

$$F_{1sop} = \frac{3}{l^3} \left(EIs + \frac{P_{1sop}sl^2}{2} \right)$$

$$F_{1sop} = \frac{3}{(0,268)^3} \left(\left(176000000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right) (2,667 * 10^{-10} \text{ m}^4) (0,01 \text{ m}) + \frac{(52 \text{ N})(0,01 \text{ m})(0,268)^2}{2} \right)$$

$$F_{1sop} = 3 \text{ N}$$

Ya conocida la fuerza requerida y el peso que actúa en un soporte, se realiza el análisis para el esfuerzo combinado usando la ecuación 18.

$$\sigma_{com} = \frac{F}{A} + \frac{Mc}{I}$$

$$\sigma_{com} = \frac{P_{1sop}}{b * h} + \frac{(F_{1req} * l) * \frac{h}{2}}{I}$$

$$\sigma_{com} = \frac{52 \text{ N}}{(0,05 \text{ m})(0,004 \text{ m})} + \frac{((53,875 \text{ N})(0,268 \text{ m})) \left(\frac{0,004 \text{ m}}{2} \right)}{2,667 * 10^{-10} \text{ m}^4}$$

$$\sigma_{com} = 108,5 \text{ MPa}$$

El cálculo del factor de seguridad para el esfuerzo combinado se ejecuta con la ecuación 25. El esfuerzo admisible del acero inoxidable AISI 304 es igual a 69500 psi, equivalente a 480 MPa (Anexo 14).

$$n_s = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{com}}$$

$$n_s = \frac{480 \text{ MPa}}{108,5 \text{ MPa}}$$

$$n_s = 4,42$$

Para calcular el esfuerzo por pandeo, se ha determinado en forma sucesiva los siguientes parámetros: el radio mínimo (ecuación 14), relación de esbeltez (ecuación 13) para compararla

con la relación de esbeltez límite, donde la constante de condiciones de extremos de columnas es $C = 1/4$ debido a que el extremo inferior se encuentra empotrado y el extremo superior permite el libre movimiento alternante a los lados (Ver Anexo 2) y $E = 176 \text{ MPa}$ (Ver Anexo 15) se utiliza la ecuación 15, y así posteriormente saber bajo que criterio analizar.

Radio mínimo:

$$k = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

$$k = \sqrt{\frac{2,667 * 10^{-10} \text{ m}^4}{(0,05 \text{ m})(0,004 \text{ m})}}$$

$$k = 0,001154 \text{ m}$$

Relación de esbeltez:

$$R_{esb} = \frac{l}{k}$$

$$R_{esb} = \frac{0,268 \text{ m}}{0,001154 \text{ m}}$$

$$R_{esb} = 232,23$$

Relación de esbeltez límite:

$$R_{esb_lim} = \sqrt{\frac{2\pi^2 CE}{\sigma_y}}$$

$$R_{esb_lim} = \sqrt{\frac{2\pi^2 \left(\frac{1}{4}\right) \left(176000000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right)}{480000000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}}$$

$$R_{esb_lim} = 1,345$$

Comparación de la relación de esbeltez y la relación de esbeltez límite:

$$R_{esb} > R_{esb_lim}$$

$$232,23 > 1,345$$

Se utiliza la fórmula de Euler (ecuación 16) para el esfuerzo por pandeo:

$$\sigma_{pan} = \frac{C\pi^2 E}{\left(\frac{l}{k}\right)^2}$$

$$\sigma_{pan} = \frac{\left(\frac{1}{4}\right) (\pi^2) \left(176000000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right)}{\left(\frac{0,268 \text{ m}}{0,001154 \text{ m}}\right)^2}$$

$$\sigma_{pan} = 0,00805 \text{ MPa}$$

Se puede concluir que el esfuerzo de pandeo calculado está muy por debajo del esfuerzo admisible del material equivalente a 480 MPa.

Finalmente, para conocer si existe falla a la fatiga se comienza determinando los factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga.

Factor de modificación por la configuración de superficie k_a :

Los muelles cuentan con un acabado (ASTM 2B y 1 mostrado en el Anexo 15) de laminado en caliente por consiguiente los valores son: $a = 57,7$; $b = -0,718$ (Anexo 3) y la resistencia a la tensión del material es de $S_{ut} = 480 \text{ MPa}$. Se aplica la ecuación 21.

$$k_a = a * S_{ut}^b$$

$$k_a = 57,7 * (480)^{-0,718}$$

$$k_a = 0,69$$

Factor de modificación por el tamaño k_b :

Para un diámetro externo se determina según su geometría transversal por la ecuación 23.

$$d = \frac{0,808 * \sqrt{hb}}{0,370}$$

$$d = \frac{0,808 * \sqrt{0,004 \text{ mm} * 0,05 \text{ mm}}}{0,370}$$

$$d = 30,8 \text{ mm}$$

Al diámetro extremo se encuentra en el siguiente intervalo $2,79 \leq d \leq 51 \text{ mm}$, por ello se utiliza la ecuación 22 para conocer el factor de tamaño.

$$k_b = 1,24 * d^{-0,107}$$

$$k_b = 1,24 * 30,8^{-0,107}$$

$$k_b = 0,86$$

Factor de modificación por carga k_c :

Al ser el esfuerzo combinado con carga a la flexión se considera que dicho factor es igual a la unidad.

$$k_c = 1$$

Factor de modificación por la temperatura k_d :

Ya que los muelles solo están expuestos a la temperatura ambiente, se determina según el efecto de la temperatura de operación en la resistencia a la tensión de acero mostrado en el Anexo 3.

$$k_d = 1$$

Factor de confiabilidad k_e :

Al encontrarse la resistencia a la tensión por debajo de 1400 MPa, se considera una confiabilidad media, por medio del Anexo 3 se obtiene el factor de confiabilidad.

$$k_e = 1$$

Factor de efectos varios k_f :

En vista que los muelles no se encuentran afectados por anomalías se considera la unidad en estos efectos varios.

$$k_f = 1$$

Conocidos ya los factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga, se procede a calcular el límite de resistencia crítica a la fatiga por medio de la ecuación 20, sabiendo que para la resistencia a la tensión (S_{ut}) está por debajo de los 1400 MPa, entonces según la ecuación 24 el límite de resistencia a la fatiga equivale a $S'_e = 0,5 * S_{ut}$.

$$S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f * S'_e$$

$$S_e = 0,69 * 0,86 * 1 * 1 * 1 * 1 * 0,5 * 480 \text{ MPa}$$

$$S_e = 142,42 \text{ MPa}$$

Por último, se conoce el factor de seguridad utilizando la ecuación 19, con el valor ya conocido del esfuerzo máximo de fluctuación del muelle ($\sigma_a = \sigma_{com} = 98,9$ MPa) y el límite de resistencia crítica a la fatiga (S_e).

$$n_s = \frac{S_e}{\sigma_a}$$

$$n_s = \frac{142,42 \text{ MPa}}{98,9 \text{ MPa}}$$

$$n_s = 1,44$$

6.6.4 Sistema de alimentación y descarga

En este sistema se propuso una tolva de dos quiebres semejante al del bosquejo de la Figura 25, sus medidas laterales de la partes superior, intermedia y baja son de 255 mm; 120 mm y 85 mm respectivamente, y su alto y ancho son de 425 mm por 365 mm; misma que cuenta con un almacenamiento de 22,57 litros (Figura 61), adicional se colocaron dos brazos a los extremos de la tolva con dirección hacia abajo para ser sujetados al bastidor.

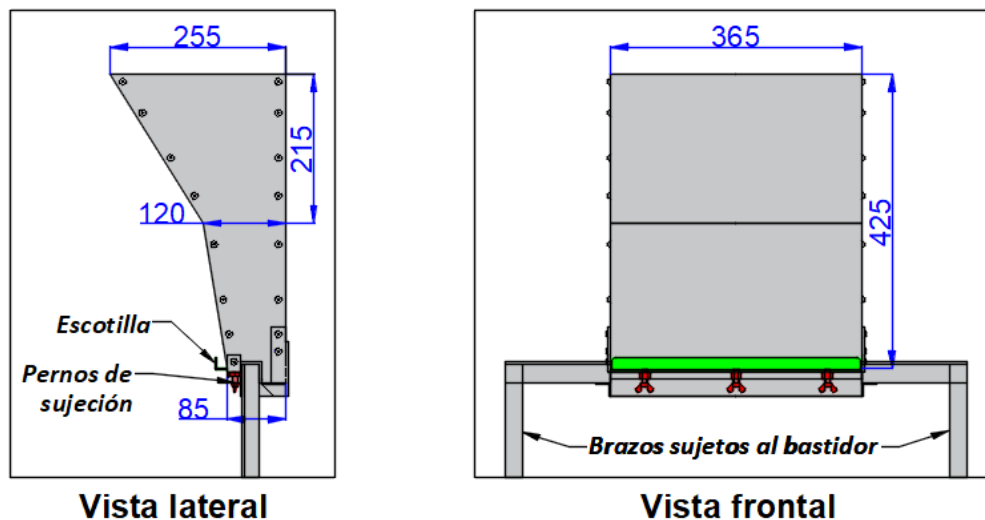


Figura 61. Sistema de alimentación del prototipo (tolva).
Fuente: Autor.

Por último, en este sistema se consideró la salida de los granos de café con las paletas móviles (similar al bosquejo de la Figura 26), mismas que permiten el direccionamiento de los granos que culminaron la clasificación densimétrica (Figura 62), estas paletas dividen respectivamente de izquierda a derecha los granos ligeros, intermedios y pesados.

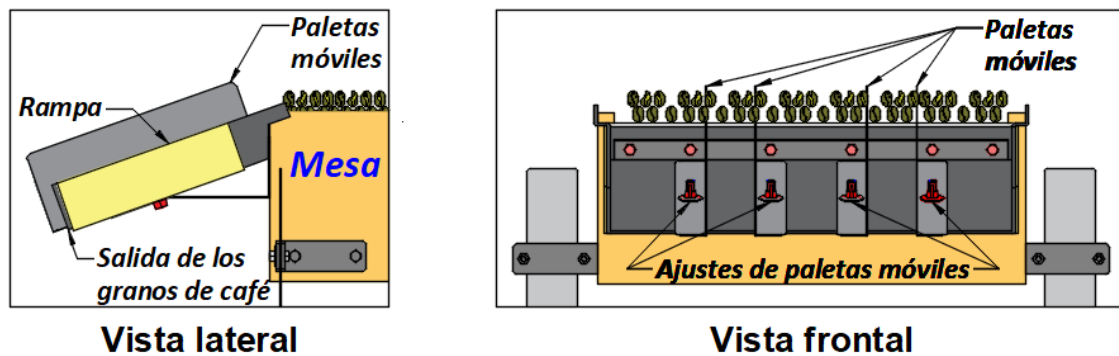


Figura 62. Sistema de descarga del prototipo (paletas móviles).
Fuente: Autor.

6.6.5. Sistema de mesa y bastidor

Para las dimensiones de la mesa, se consideraron tomando como referencia el manual de la clasificadora densimétrica (Silomax, 2020) donde muestra que su largo es aproximadamente el doble de su ancho, por ello se propuso las medidas de la caja de la mesa de 425 mm de ancho por 810 mm de largo y 170 mm de espesor. Adicional a la caja de la mesa se agrega una estructura que sirve de sujeción de la plancha de *plywood* agujereada, así como también para que los granos no se caigan de la mesa al momento de encontrarse en movimiento (Figura 63).

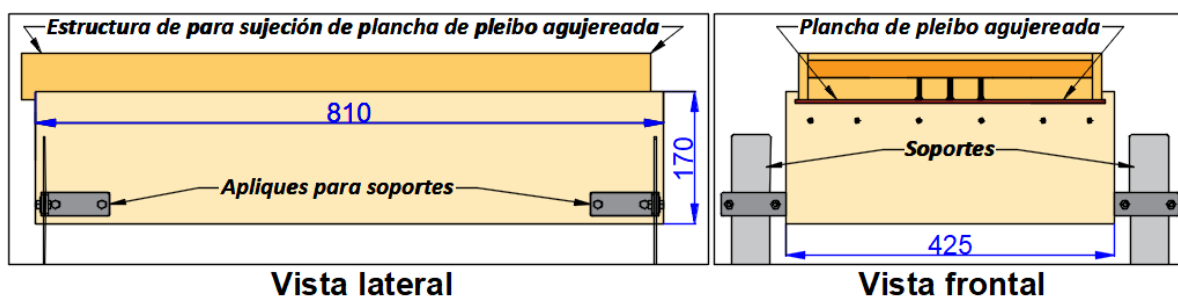


Figura 63. Sistema de mesa oscilante.
Fuente: Autor.

El bastidor como base de todos los sistemas, es el encargado de permitir el movimiento con ayuda de su junta de dos giros y los mecanismos de inclinación (Figura 64).

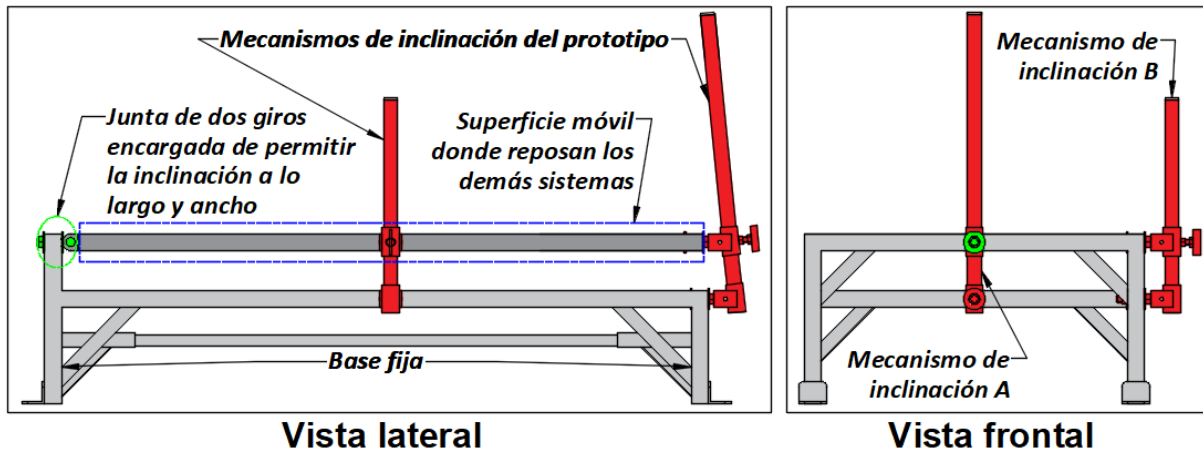


Figura 64. Bastidor detallado.
Fuente: Autor.

Los mecanismos de inclinación de la parte móvil del bastidor son dos piezas iguales con la diferencia que una permite más inclinación que la otra, estos mecanismos son de libre movimiento y se mantiene la inclinación decida con su perno de sujeción (Figura 65).

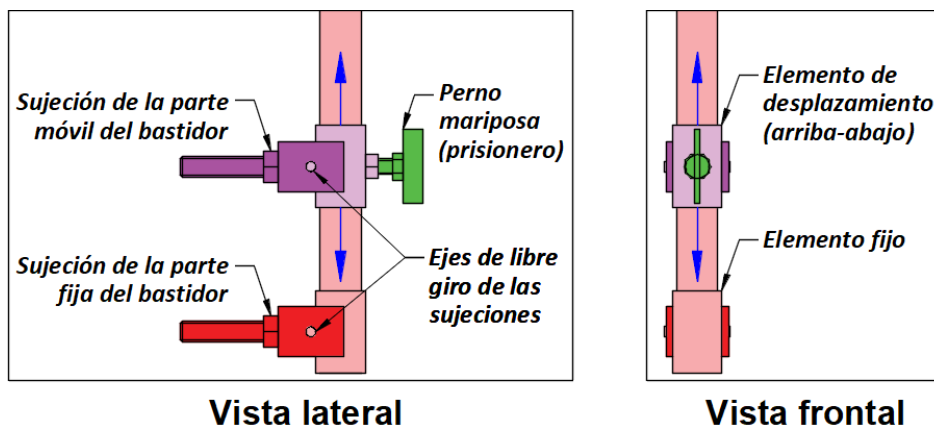


Figura 65. Mecanismos de inclinación del bastidor.
Fuente: Autor.

En este sistema se junta la mesa y el bastidor por medio de los soportes que permiten el movimiento alternante; dando lugar a que cuando se incline el batidor, la mesa se inclina solidaria al mismo, de igual manera los demás sistemas que se encuentran fijados a la parte móvil del bastidor.

6.6.6. Sistema eléctrico

Para la implementación del sistema eléctrico se consideró en primera instancia el software libre CAdE SIMU, para la posterior construcción del circuito de accionamiento eléctrico.

6.6.6.1. Circuito de control

En el diagrama del circuito de control de la Figura 66, se tiene que presionar el pulsador ON del soplante para el encendido del mismo y con ello el auxiliar del contactor del soplante permite el control del variador de frecuencia sobre el motor trifásico; seguidamente al presionar el pulsador ON del motor trifásico, este queda habilitado para su respectivo control mediante el variador de frecuencia. De esta manera se restringe que la máquina pueda entrar en movimiento siempre y cuando el soplante esté encendido; de igual manera el motor se puede apagar independientemente con su pulsador OFF, mientras que, al presionar el pulsador OFF del soplante se desconecta soplante y motor.

Las luces piloto del soplante representan el encendido, apagado y sobrecalentamiento, mientras que las luces piloto del motor representan su encendido y apagado; al aplastar el interruptor STOP (Parada de Emergencia) ya no se refleja encendida ninguna luz piloto, puesto que se desconecta el control totalmente y se debe comenzar el control desde el principio una vez que se habilite el interruptor STOP.

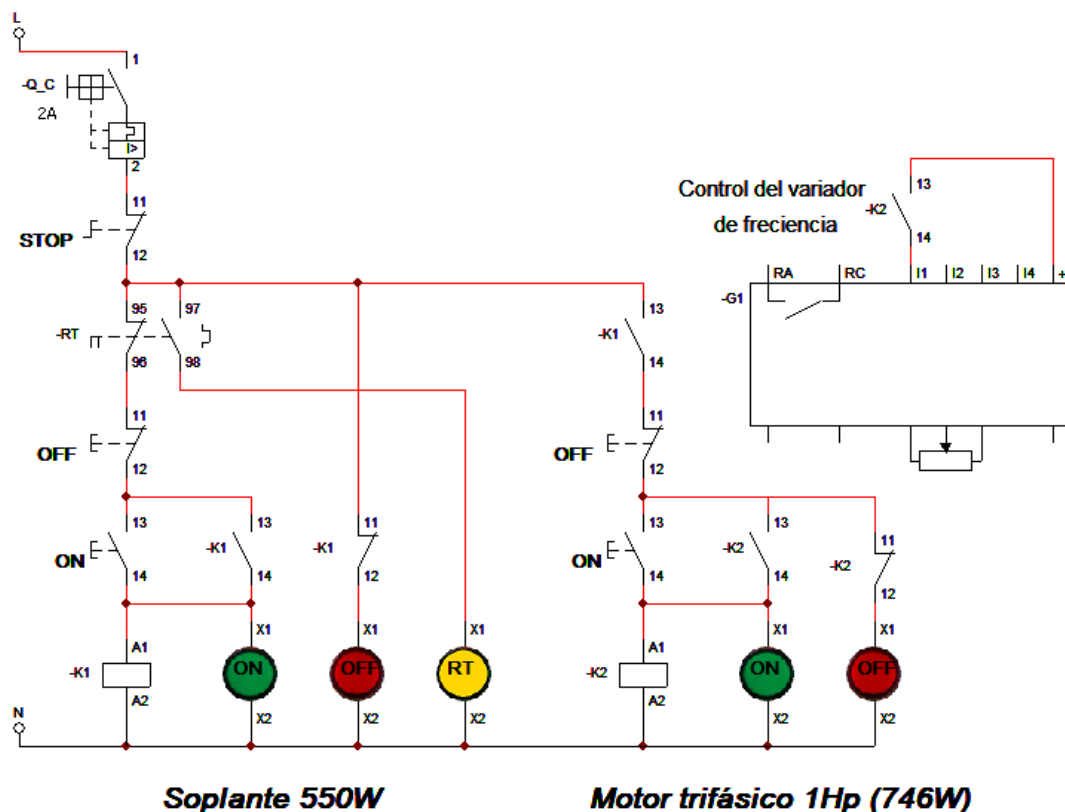


Figura 66. Diagrama del circuito de control.

Fuente: Autor.

6.6.6.2. Circuito de fuerza

En la Figura 67 se muestra el diagrama de fuerza donde se evidencia la implementación de un contactor y relé térmico para el soplante conectado a una fuente de 110 V, mientras que para el motor trifásico se utiliza un contactor del cual se desprende en paralelo un ventilador y un variador de frecuencia conectados a una fuente de 220 V. El ventilador se lo considera para el enfriamiento del motor ya que girará a revoluciones bajas a las que opera normalmente.

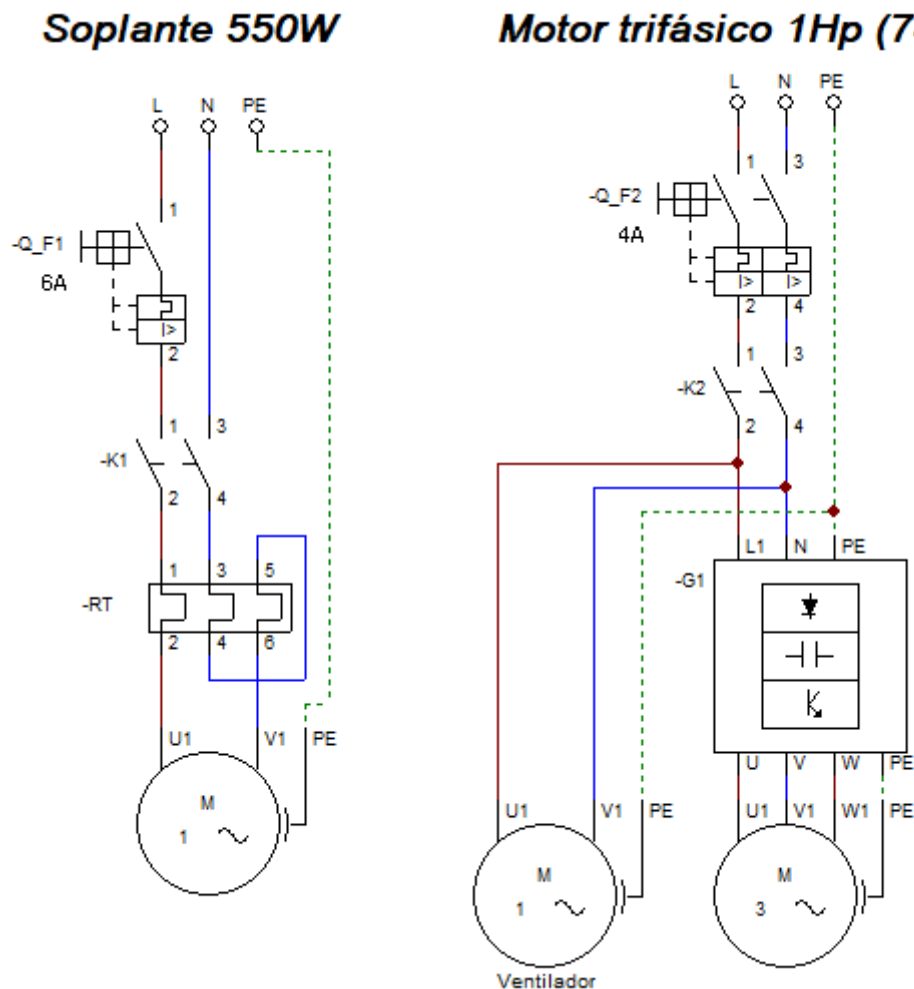


Figura 67. Diagrama de circuito de fuerza.
Fuente: Autor.

6.8. Pruebas operacionales

Para poder probar la máquina primero se comienza con la regulación a sus parámetros operacionales anteriormente localizados en la fase experimental, seguidamente se coloca café en la tolva para posteriormente poner en marcha el prototipo (en esta prueba operacional se usó 4,8 kg), mediante este proceso se logra que el café se tienda por completo sobre la mesa haciendo que el flujo de aire se distribuya de mejor manera; en cuanto a los granos que ya

cumplieron el ciclo de recorrido de la mesa, se los regresa a la tolva para cumplir con la adecuada clasificación.

La validación en la clasificación densimétrica de dicho prototipo final se efectuó realizando un muestro en cada sección de salida de los granos de café (liviano, medio y pesado), pesando en iguales proporciones de volumen (botella de 355 ml). El resultado obtenido se expone en la siguiente Tabla 4 (Para mayor comprensión de los resultados obtenidos de clasificación revisar el Anexo 13), adicionalmente en las siguientes Figuras 68, 69 y 70, se presentan las imágenes del proceso de pesado en las muestras tomadas.

Tabla 4. Resultados de pruebas operacionales.

Datos					Resultados						
Velocidad de giro en la oscilación [rpm]	Amplitud de oscilación en la excéntrica [cm]	Grados de inclinación a lo largo de la mesa α [°]	Grados de inclinación a lo ancho de la mesa β [°]	Velocidad en el flujo de aire en la mesa [m/s]	Capacidad de flujo de granos de café [qq/h]	Muestra en la salida de los granos <i>liviano</i> [g]	Muestra en la salida de los granos <i>medios</i> [g]	Muestra den salida de granos <i>pesados</i> [g]	Diferencia de pesos entre <i>pesados</i> y <i>livianos</i> [g]	Diferencia de peos ente <i>medios</i> y <i>livianos</i> [g]	Diferencia de peos ente <i>pesados</i> y <i>medios</i> [g]
282	1	0,49	0,98	1,7	2,3	281	288	293	12	7	5
<i>Visto en términos de densidad [kg/m³]</i>						792	811	825	33	19	14

Fuente: Autor.



Figura 68. Peso del muestro en la salida de granos livianos.

Fuente: Autor.



Figura 69. Peso del muestro en la salida de granos medios.
Fuente: Autor.







Figura 70. Peso del muestro en la salida de granos pesados.
Fuente: Autor.

6.9. Diseño de detalle

La máquina ya construida y puesta a prueba cuenta con los sistemas de transmisión de potencia, generación de aire, movimiento alternante, alimentación y descarga, mesa y bastidor, eléctrico. La Tabla 5 expresa los componentes de más importancia.

Tabla 5. Componentes de mayor importancia del prototipo.

Sistemas	Componentes importantes	Características	Explicación de su funcionamiento
<p data-bbox="248 510 416 568">Trasmisión de potencia</p> 	<p data-bbox="517 327 695 356">Motor trifásico</p> 	<p data-bbox="762 309 1099 546">Potencia: 1 Hp Marca: Siemens Modelo: 1LA7 073-2YA60 Revoluciones: 3320 rpm Torque de arranque: 2,15 Nm Torque nominal: 5,3 Nm Más datos técnicos en el Anexo 16.</p>	<p data-bbox="1123 309 1385 589">Encargado de entregar la potencia requerida para dar movimiento a la mesa. <i>Nota:</i> por motivo de insolvencia económica se hizo uso del motor mencionado para la construcción del prototipo de este proyecto.</p>
	<p data-bbox="517 598 695 627">Eje excéntrico</p> 	<p data-bbox="762 598 1099 680">Excentricidades de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 mm de agujeros de rosca para perno UNC 3/8”.</p>	<p data-bbox="1123 598 1385 741">Hace que el movimiento circular que entrega el motor se transforme en un movimiento lineal.</p>
	<p data-bbox="576 891 639 920">Biela</p> 	<p data-bbox="762 840 1099 1014">Estructura formada de: 3/8” UNC grado SAE 2 en un extremo y de cuatro tuercas soldadas en el otro extremo, ambas partes permite colocar rodamiento 6230.</p>	<p data-bbox="1123 840 1385 1072">Cumple con la función de dar el movimiento de oscilación que emite el eje excéntrico, permite regular la longitud de 12 a 28 cm (la longitud en el prototipo es de 24 cm).</p>
<p data-bbox="240 1144 421 1202">Sistema de generación aire</p> 	<p data-bbox="555 1081 660 1111">Soplante</p> 	<p data-bbox="762 1081 1099 1263">Potencia: 550 W. Marca: BP. Diámetro de descarga de aire: 4”. Voltaje: 110 V. Revoluciones: 3600 rpm.</p>	<p data-bbox="1123 1081 1385 1164">Su función es inyectar aire a la mesa por medio de conductos.</p>
	<p data-bbox="504 1359 711 1388">Conducto flexible</p> 	<p data-bbox="762 1359 1099 1417">Manguera flexible de 3” de diámetro y 40 cm de largo.</p>	<p data-bbox="1123 1359 1385 1563">Es de gran importancia debido a que permite el libre movimiento de la mesa mientras por su interior transporta el flujo de aire dado por el soplante.</p>
<p data-bbox="264 1715 400 1798">Sistema de movimiento alternante</p>	<p data-bbox="504 1585 711 1615">Soportes flexibles</p> 	<p data-bbox="762 1585 1099 1668">Material: Acero inoxidable AISI 304 Dimensiones: 400*50*4 mm</p>	<p data-bbox="1123 1585 1385 1700">Son los encargados de sostener y permitir el movimiento de vaivén de la mesa.</p>

<p>Sistema de alimentación y descarga</p>	<p>Tolva</p> 	<p>Dimensiones: 42,5 cm de alto, 36,5 cm de ancho y 3 niveles de espesor en la parte superior, intermedia y baja de 25,5 cm 12 cm y 8,5 cm respectivamente. Volumen de almacenamiento de 22,57 L.</p>	<p>Permite el almacenamiento y caída gradual de los granos de café.</p>
	<p>Paletas móviles</p> 	<p>Dimensiones: espesor de 0,7 mm y longitud de 22 cm forma dos planos, uno perpendicular a la rampa de 8 cm y otro paralelo a la rampa de 3 cm.</p>	<p>Distribuye en proporciones la salida de los granos de café clasificados.</p>
<p>Sistema de mesa y bastidor</p> 	<p>Mesa</p> 	<p>Caja de madera con un agujero de 3" al costado posterior y 1425 agujeros en la parte superior. 56 bandas lineales de nylon Nro. 6. Dimensiones de 42,5*81*17 cm.</p>	<p>En este componente se realiza la clasificación densimétrica ya que es aquí donde el café recorre por una superficie que expulsa aire en dirección perpendicular a la misma.</p>
	<p>Bastidor</p> 	<p>Conformado en mayor proporción de tubo cuadrado estructural de 30 mm con un espesor de 1,5 mm. Contiene una junta que permite dos grados de libertad. Mide 124 cm de largo, 61 cm de ancho y 30 cm de alto.</p>	<p>Su principal función es la regulación de las inclinaciones tanto a lo largo y ancho de la mesa.</p>
<p>Sistema eléctrico</p> 	<p>Variador de frecuencia</p> 	<p>Marca: LS IS Modelo: SV022IG5A-2 Potencia: 4,5 KVA Fases: 3 Voltaje de entrada :200-230 V Corriente de entrada: 14,5 A. Voltaje de salida: 0-voltaje de entrada V. Variación de frecuencia: 0,1-400 Hz</p>	<p>Permite variar las revoluciones de giro del motor <i>Nota:</i> por motivo de insolvencia económica se hizo uso del presente variador de frecuencia con las características antes señaladas para el motor del prototipo elaborado este proyecto.</p>

Fuente: Autor.

6.10. Análisis de costos del prototipo final

Los materiales, partes, piezas, y procesos constructivos que se emplearon para la construcción de la máquina se muestran en Tabla 6, así como también sus costos. El detalle de los materiales y sus cantidades, así como el proceso de construcción se muestran en el Anexo 18.

Tabla 6. Costos de construcción de la máquina.

Materiales, partes y piezas	708,40 USD
Proceso de construcción	688,00 USD
Total	1396,40 USD

Fuente: Autor.

6.11. Instrucciones de operación, cuidado y mantenimiento del prototipo.

Tras la instalación del prototipo en el lugar de trabajo (fijación al piso nivelado) y conexión a la red eléctrica, se tiene los siguientes pasos a seguir para su adecuado funcionamiento:

- Se calibra la mesa a sus ángulos correspondientes.
- Se regula la velocidad de giro del motor por medios del variador de frecuencia.
- Se direccionan las paletas móviles y se colocan recipientes de recolección en la salida de los granos de café clasificados.
- Se llena la tolva con los granos de café.
- Se pone en marcha el prototipo.
- Se abre la compuerta de la tolva.

Finalmente, para un mantenimiento prolongado del prototipo, se requiere de inspecciones cotidianas para mantenerse alerta ante algún derrame de líquidos y posibles plagas (termitas) ya que al ser de madera es vulnerable a daños por estos agentes externos. Para los rodamientos que permiten el traslado de potencia por medio del sistema biela-manivela-corredera, se tiene que su duración de trabajo es de 5063238 horas debido a su baja carga; asumiendo que la máquina trabaje sin descaso los rodamientos se deberían cambiar cada 586 años; con respecto al movimiento alternante al que están sometidos los muelles que soportan la mesa, no presentan fallo a la fatiga.

7. Discusión

En base a la búsqueda de información sobre máquinas densimétricas en universidades del país no se evidencia un prototipo con un desarrollo similar al propuesto, sin embargo, se pueden encontrar máquinas clasificadoras densimétricas de otros granos, ejemplificando el trabajo de tesis titulado “Estudio y diseño de una clasificadora gravimétrica de maní (*arachis hypogaea*) como estrategia de implementación en pequeñas industrias” (Meza y Sornoza, 2017) que implementan en su prototipo clasificador gravimétrico de maní, un soplante Blower como fuente de generación de flujo de aire, guardando similitud con el prototipo clasificador densimétrico tratado en el presente trabajo, a diferencia de las máquinas clasificadoras densimétricas comerciales que utilizan turbinas de aire.

El diseño del prototipo clasificador densimétrico se basa en clasificadoras de café tipo mesa existentes. Este tipo de clasificación posibilita que los granos de café sean separados de acuerdo a su peso específico indiferentemente de su tamaño, así como también separa granos de café malformados, brocados y granos partidos que tengan una menor densidad, mejorando así la calidad del sabor del café en taza. Para esta función, el prototipo cuenta con orificios y bandas lineales en toda la superficie por donde se mueven los granos de café. La mesa es inclinable y por medio de un soplador el aire fluye a través de los orificios en sentido perpendicular a la misma, permitiendo que los granos de café ligeros se posicionen por encima de los pesados.

Durante la fase experimental del prototipo, se realizaron diversas pruebas de ensayo-error; para ello se fijaron como constantes los siguientes criterios: el tamaño, humedad, variedad (caturra) de los granos de café, dimensiones, distribución de agujero y bandas lineales en la mesa; con ello se determinaron los siguientes parámetros operacionales: inclinaciones a lo largo y ancho de la mesa (inclinación α y β), la velocidad angular (248 rpm), amplitud requerida (1 cm en el eje excéntrico) y una velocidad en el flujo de aire (17 m/s). Para las inclinaciones se culminó variando los grados de libertad a lo largo (α), elevando la mesa 1 cm (0, 49°), de igual manera la inclinación a lo ancho (β) en 1 cm (0, 98°).

El punto de partida de la frecuencia para iniciar el proceso fue de 4 a 6 Hz, a medida que se llevaba a cabo la experimentación, estos valores de frecuencia fueron cambiando con incrementos de 1 Hz y luego al conseguir una clasificación a 5 Hz, se varió en intervalos de 0,05 Hz, para el consiguiente parámetro operacional de frecuencia de giro (5.05 Hz equivalente a 282 rpm en frecuencia de giro de motor), cabe recalcar que para conocer el valor en rpm se hizo uso de un tacómetro UNI-T UT373.

Finalmente, se precisó una máquina que cuenta con un motor bipolar trifásico de 1 Hp, marca Siemens controlado por un variador de frecuencia, el cual puede reducir su velocidad angular a 282 rpm haciendo que el eje excéntrico provoque oscilaciones según la amplitud de la excéntrica que se fue variando a lo largo de proceso experimental de 5 mm en 5 mm (1 cm de amplitud).

Para la implementación del sistema de generación de aire, se utilizó un soplante de fragua Blower de 550 W (de 4" de diámetro en la salida del aire) que permitió el flujo requerido con el 50% de la escotilla abierta, a diferencia del soplante Blower de 1 Hp (de 5" salida de aire) utilizado en la fase de experimental que permitió el flujo de clasificación requerido con un 0% de la escotilla abierta (valores medidos por medio de un anemómetro UNI-T UT363). El flujo de aire es dirigido por medio de conductos, entrando en forma transversal a la salida del mismo como se muestra en la Figura 24, a diferencia de los modelos existentes; los cuales tienen el flujo de entrada de aire en dirección a la mesa oscilante (Silomax), sin embargo, esta configuración de entrada no impide que el flujo de aire salga de forma perpendicular a la mesa.

Para la puesta en marcha se calibran las inclinaciones de la mesa oscilante, se enciende el prototipo y el recorrido de los granos de café comienza en la tolva que permiten su almacenamiento y caída gradual, continúa con la caída de los granos a la mesa oscilante que mediante el movimiento de vaivén y el flujo de aire hace que los estos se dispersen encaminándose a sus respectivos niveles de clasificación y finaliza con las paletas móviles que son las encargadas de ayudar a direccionarlos según las proporciones deseadas, ya sean estos granos livianos, intermedios o pesados.

En el diagrama del circuito de control se debe presionar el pulsador ON del soplante para el encendido del mismo, con ello, haciendo uso de un auxiliar normalmente abierto del contactor del soplante, se da paso al control del variador de frecuencia que comanda el motor trifásico, el cual hace que la máquina pueda entrar en movimiento siempre y cuando el soplante esté encendido. El motor se puede apagar independientemente con su pulsador OFF; si llegase el caso de que se apague primero el soplante, el motor también se detendrá y se repite nuevamente la restricción del control eléctrico.

El diseño elaborado del prototipo de máquina densimétrica de café cuenta con una capacidad de almacenamiento en la tolva de 22,57 litros, la capacidad de clasificación es de 2,3 qq/h, necesitando una conexión a una tensión de red eléctrica de 220 V; durante las pruebas finales de clasificación se obtuvo un promedio de densidad en los granos pesados de 825 kg/m³, en los

medios de 811 kg/m^3 y en los livianos de 792 kg/m^3 , teniendo en cuenta que se trabajó con una muestra de prueba de 800 kg/m^3 . Por otra parte, el costo de máquinas densimétricas de características similares, con una capacidad de clasificación de 8 qq/h se encuentra alrededor de 12 mil dólares, en este caso teniendo en cuenta que el precio del prototipo planteado es de aproximadamente 1,400 dólares se considera accesible.

8. Conclusiones

- Se definió un prototipo clasificador densimétrico tipo mesa, con una conexión a una tensión de red eléctrica con acceso a 110 V para el soplante y 220 V para el motor, como parámetros de operación se determinó: 1 cm de excentricidad (amplitud), inclinación a lo largo con $\alpha = 0,49^\circ$ e inclinación a lo ancho con $\beta = 0,98^\circ$, velocidad de giro a 282 rpm y flujo de aire de 1,7 m/s.
- Sobre la propuesta de diseño experimental se realizaron cálculos para la evaluación y mejoras en las partes principales que requerían atención, entre ellos destacan el sistema de transmisión de potencia y movimiento alternante, construyendo una máquina (prototipo final) con base en un diseño de detalle acorde a las necesidades de clasificación.
- Con una muestra de 4,8 kg de granos de café que se empleó para la validación de la máquina; se obtuvo un resultado de clasificación densimétrica de los mismos en las tres categorías previstas: livianos, medios y pesados; en esa clasificación se realizó una comparativa de diferencias de pesos en la que se obtuvo: entre pesados y livianos una diferencia de 12 g, entre medios y livianos una diferencia de 7 g y entre pesados y medios una diferencia de 5 g.
- Por cuestiones de insolvencia económica; para este prototipo se utilizó un motor bipolar de 1 Hp de la marca Siemens, el cual cuenta con un par de arranque de 5,3 Nm, un par nominal de 2,15 Nm y su velocidad de giro de 3320 rpm; dicho motor sí cumple con el torque necesario para el buen funcionamiento del prototipo.

9. Recomendaciones

- Al igual que las máquinas existentes, se recomienda realizar una clasificación previa por tamaño usando cribas normalizadas para los granos de café, y de esta manera conseguir que los granos a clasificar por densidad sean del mismo tamaño.
- Se recomienda hacer un ensayo operacional con el fin de asegurar una adecuada calibración para el proceso de clasificación densimétrica, iniciando con la extensión de los granos de café sobre la mesa para que el flujo de aire se extienda proporcionalmente y sea aprovechado por todos los agujeros.
- Tener en cuenta que el soplante debe estar encendido antes de que el motor parta, para con ello garantizar que se realice la adecuada clasificación, debido a que el flujo de aire toma un papel importante en la separación de los granos haciendo que los más ligeros se mantengan encima de los pesados, consiguiendo así, con ayuda de las inclinaciones ya propuestas, que los ligeros desciendan a lo ancho, los pesados asciendan a lo ancho y ambos desciendan a lo largo a medida que la mesa oscila.
- Para una mejor eficiencia del prototipo elaborado en el presente proyecto, se recomienda usar un motor que se encuentre ajustado a la potencia de diseño (110,6 W), siendo un motor octapolar de 180 W de la marca Weg con un par de arranque de 4,04 Nm, par nominal de 2,02 Nm y su velocidad de giro de 850 rpm; consiguientemente se debe utilizar un variador de frecuencia para su calibración de velocidad de giro siendo recomendable la marca Siemens de la serie 6SE64202UC125AA1 con prestaciones de 250 W y variación de frecuencia de 0 a 650 Hz; para llegar a las revoluciones que el prototipo necesita (282 rpm), bastaría con regular el variador de frecuencia a 20 Hz.

10. Bibliografía

- AgriEXPO. (19 de Diciembre de 2019). *Seleccionadora de semillas DC-20*. agriexpo.online: <https://www.agriexpo.online/es/prod/haldrup/product-175339-50334.html>
- Alistair. (2020). <https://www.alistairstutorials.co.uk/tutorial16.html>
- BEER, JOHNSON, y CORNWELL. (2010). *MECÁNICA VECTORIAL PARA INGENIEROS DIMÁMICA NOVENA EDICIÓN*. MEXICO: MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Budynas, R. G., y Nisbett, J. K. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México: MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Centro de Comercio Internacional. (s.f.). <https://www.intracen.org/guia-del-cafe/calidad-del-cafe/Tamano-del-grano/>
- Cimbria. (29 de Mayo de 2015). *Separador por gravedad utilizado para la separación de productos de tamaño casi idéntico con pesos diferentes*. YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=r2Q8rqSB9dg&t=140s>
- Cimbria. (s.f.). *Separador por gravedad*. Cimbria.com: <https://www.cimbria.com/en/products/processing/gravity-separator.html>
- Compañía de suministro de molinos de semillas de la costa oeste. (2 de Julio de 2015). *Mesas Oliver Gravity*. YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=FFSBH4PXW5w>
- Cortés, S. (30 de Junio de 2021). *Tueste Café*. Humedad en el café: <https://tuestecafe.mx/blogs/blog/humedad-en-el-cafe>
- DIPAC. (Julio de 2022). *Dipacmanta.com*. <https://dipacmanta.com/categoria-de-productos/>
- EL UNIVERSO. (1 de Diciembre de 2021). <https://www.eluniverso.com/noticias/economia/por-primera-vez-la-libra-de-un-cafe-ecuadoriano-especial-se-pago-a-100-dolares-en-subasta-internacional-nota/#:~:text=Por%20primera%20vez%20la%20libra,%7C%20Econom%3%ADa%20%7C%20Noticias%20%7C%20El%20Universo>
- Equipo de semillas de comerciantes de productos básicos. (12 de Julio de 2016). *Despedrador Oliver 4848*. YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=9nZa5jAGum8>

- Fabricación de LMC. (15 de Agosto de 2017). *Separador por gravedad de la línea de productos LMC*. YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=7lqkzWCHzPo>
- Fórum Cultural del Café. (2020). <https://www.revistaforumcafe.com/los-colores-del-cafe>
- Gomez, S., y Parra, J. (Noviembre de 2008). *INTRODUCCION PARA ENSEÑAR EL CONCEPTO DE CONSERVACION DE*. Caldas: UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS. Proyectos de Tecnología: <https://elblogdelprofesordetecnologia.blogspot.com/2012/11/biela-manivela.html>
- González Rey, G., García Toll, A., y Ortiz Cárdenas, T. (s.f.). *Elementos de Máquinas. Correas y Poleas. Transmisiones Mecánicas*. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría CUJAE .
- Hamrock, B. J., Jacobson, B. O., y Schmid, S. R. (2000). *ELEMENTOS DE MÁQUINAS* . México: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S. A. de C.V.
- HNOS ARCE LTDA. (2018). *Ficha técnica clasificadora por densidad sg-60*. MAQUINARIA INDUSTRIAL HNOS. ARCE.: http://www.hnosarceltda.com/uploads/5/3/2/8/53288483/ficha_t%C3%A9cnica_sg-60_-_hnos_arce_2018.pdf
- HNOS ARCE LTDA. (2018). *Ficha técnica clasificadora por densidad sg-8*. MAQUINARIA INDUSTRIAL HNOS. ARCE.: http://www.hnosarceltda.com/uploads/5/3/2/8/53288483/ficha_t%C3%A9cnica_sg-8__es__2018.pdf
- HnosARCEltda. (27 de Mayo de 2013). *Densimetrica SG-100 Hnos. ARCE Ltda*. YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=vRA6TUgW2qw>
- Indiamart. (2022). *indiamart.com*. <https://www.indiamart.com/proddetail/tractor-groundnut-decorticator-machine-23371169830.html>
- ISO. (Febrero de 2007). *iso.org*. <https://www.iso.org/standard/38102.html>
- Kröger, D. (25 de Febrero de 1997). *Servidar de publicación europeo*. <https://data.epo.org/publication-server/document?iDocId=1468615&iFormat=2>
- La Joya del Café*. (2021). <https://www.lajoyadelcafe.com/tamano-del-grano-blog-de-cafe/>
- Lafebre Álvares, P. F. (2019). *Zarandas clasificadoras de café. Planos*. Loja.

- LMC LEWIS M. CARTER. (s.f.). *SEPARATORS GRAVITY*. Lmcarter.com:
<https://www.lmcarter.com/pdf/GS-Spanish.pdf>
- Máquina Electro Perú. (2017). *Máquina Electro Perú*. Máquina Electro Perú:
<https://www.maquinaelectroperu.com/clasificadora-de-granos/>
- Meza, J., y Sornoza, C. (Diciembre de 2017). *ResearchGate*.
https://www.researchgate.net/publication/329179541_ESTUDIO_Y_DISENO_DE_UNA_CLASIFICADORA_GRAVIMETRICA_DE_MANI_ARACHIS_HYPOGAEA_COMO ESTRATEGIA DE IMPLEMENTACION EN PEQUENAS INDUSTRIAS
- Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica. (Mayo de 2010).
<http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Q02-5889.pdf>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (s.f.). <https://www.agricultura.gob.ec/magap-fomenta-la-produccion-de-cafe-en-loja/>
- Mundial, M. (2023). *materialmundial.com*. <https://www.materialmundial.com/acero-inoxidable-ss-astm-sae-aisi-304-ficha-tecnica/>
- NAVAB BHAI. (19 de Septiembre de 2021). *Máquina redonda para limpieza de semillas en red molida*. YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=IfDJffvaask>
- Oliver Manufacturing. (11 de Enero de 2013). *The Destoner - Oliver Manufacturing*. YouTube:
<https://www.youtube.com/watch?v=cR7aGRdbJZg>
- PERFECT DAILY GRIND*. (17 de Agosto de 2021).
<https://perfectdailygrind.com/es/2021/08/17/entendiendo-la-densidad-del-grano-de-cafe/>
- PinHALENSE. (s.f.). *Separadora densimétrica FLUTU-AR*. Informaciones técnicas de máquinas agrícolas: <https://dinatek.ec/wp-content/uploads/pdf/ficha/FPIN20-Separadora-Densim%C3%A9trica.pdf>
- Primero Café*. (s.f.). <https://primerocafe.com.mx/caficultura/como-detectar-defectos-en-el-cafe-verde/#:~:text=Granos%20malformados%2C%20como%20concha.,parte%20interna%20tiene%20forma%20cil%C3%ADndrica.>

- Rodamientos FAG. (s.f.). *ingemecanica.com*.
<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/objetos/figutut214/FAG.pdf>
- Rodríguez, J., Cérda, L., y Sanchez, R. (2014). *Automatismos Industriales*. Madrid: COPYRIGHT Ediciones Paraninfo, SA.
- Siemens Mexico. (s.f.). *Variadores de velocidad - Siemens México*.
https://siemensmexico.com.mx/descargables/Variadores_de_Velocidad.pdf
- Silomax. (Julio de 2020). *Manual de instrucciones de mesa densimétrica SDS-120*.
<https://www.silomax.com.br/doutor/uploads/2/downloads/2020/07/download-manual-mesa-densimetica-sds-120-espanhol-c9f284187b.pdf>
- Silomax. (s.f.). *Manual de instrucciones de mesa densimétrica SDS-200*. Docplayer:
<https://docplayer.es/94620669-Sds-200-mesa-densimetica-manual-de-instrucciones.html>
- Silva Cueva, C. A. (2015). *"Diseño y cálculo de una máquina para producir briquetas a partir de cascaras de arroz"*. Loja.
- Solocafé. (2023). <http://www.solocafe.com.mx/>
- Waldunsteel. (2022). *Waldunsteel.com*. <https://waldunsteel.com/es/products/acero-1018/>
- WEG. (2023). https://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_motor_sel_web.asp#
- ZACCARIA. (s.f.). *zaccaria.com.br*. <https://www.zaccaria.com.br/site/esp/produtos-detalhes/35/mdz120-mesa-densimetica-->

11. Anexos

Anexo 1. Propiedades geométricas

A = área

G = ubicación del centroide

$I_x = \int y^2 dA$ = segundo momento de área con respecto al eje x

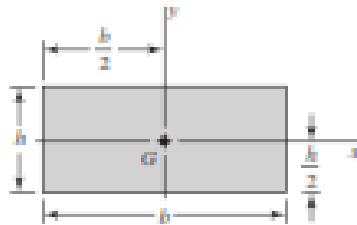
$I_y = \int x^2 dA$ = segundo momento de área con respecto al eje y

$I_{xy} = \int xy dA$ = momento mixto de área con respecto a los ejes x y y

$J_G = \int r^2 dA = \int (x^2 + y^2) dA = I_x + I_y$
= segundo momento polar de área con respecto al eje que pasa por G

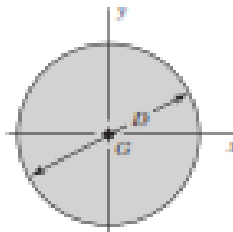
$k_x^2 = I_x / A$ = radio de giro al cuadrado con respecto al eje x

Rectángulo



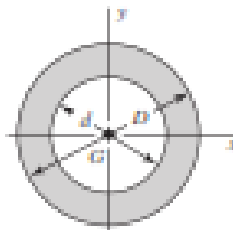
$$A = bh \quad I_x = \frac{bh^3}{12} \quad I_y = \frac{b^3h}{12} \quad I_{xy} = 0$$

Círculo



$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad I_x = I_y = \frac{\pi D^4}{64} \quad I_{xy} = 0 \quad J_G = \frac{\pi D^4}{32}$$

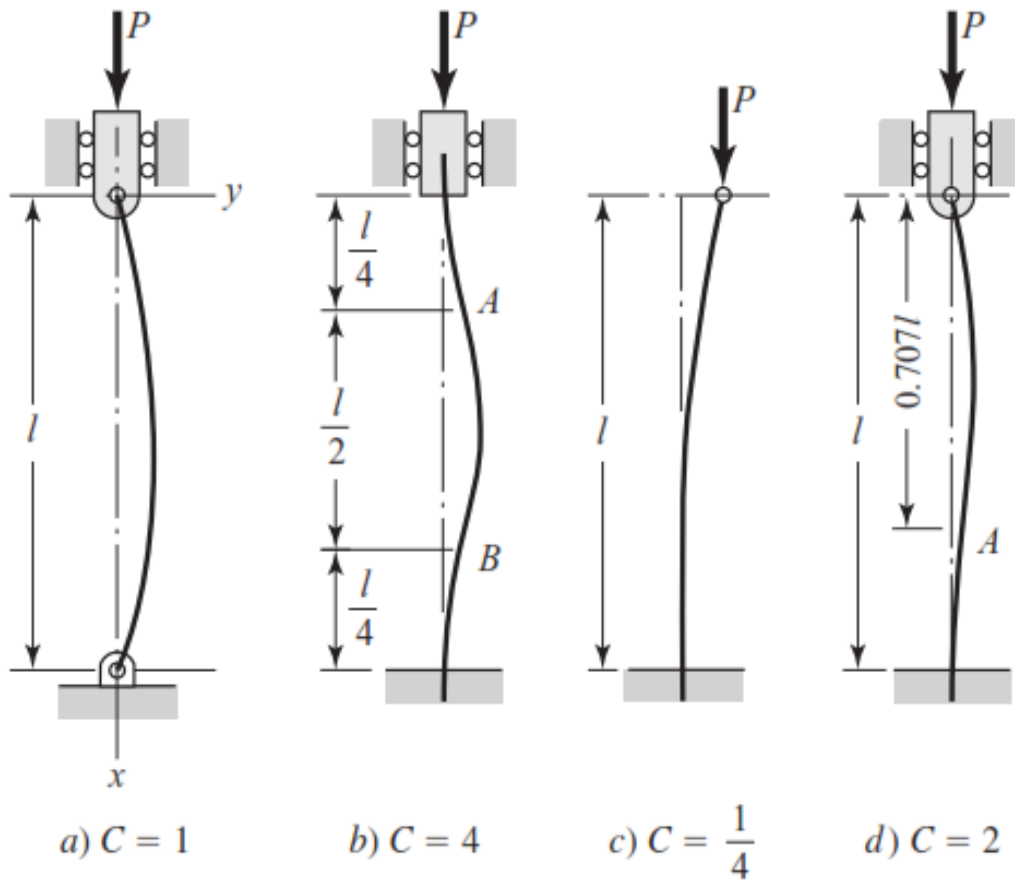
Círculo hueco



$$A = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \quad I_x = I_y = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4) \quad I_{xy} = 0 \quad J_G = \frac{\pi}{32}(D^4 - d^4)$$

Fuente: (Budynas y Nisbett, 2012).

Anexo 2. Condiciones de los extremos de columnas



Fuente: (Budynas y Nisbett, 2012).

- a) Ambos extremos están pivoteados o articulados
- b) Ambos extremos están empotrados
- c) Un extremo libre, un extremo empotrado
- d) Un extremo redondo y articulado, y un extremo empotrado

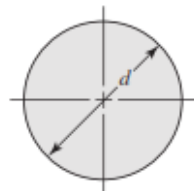
Anexo 3. Factores para la modificación del límite de resistencia a la fatiga

- Parámetros en el factor de condición superficial.

Acabado superficial	Factor a		Exponente b
	S_{utr} kpsi	S_{utr} MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

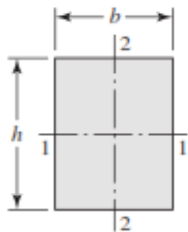
Fuente: (Budynas y Nisbett, 2012).

- Diámetro exterior según su geometría transversal.



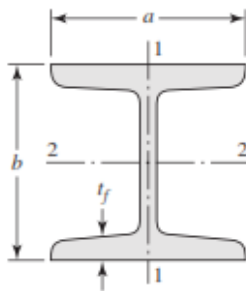
$$A_{0.95\sigma} = 0.01046d^2$$

$$d_e = 0.370d$$

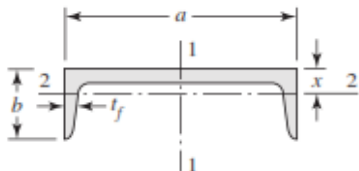


$$A_{0.95\sigma} = 0.05hb$$

$$d_e = 0.808\sqrt{hb}$$



$$A_{0.95\sigma} = \begin{cases} 0.10at_f & \text{eje 1-1} \\ 0.05ba & \text{eje 2-2} \end{cases} \quad t_f > 0.025a$$



$$A_{0.95\sigma} = \begin{cases} 0.05ab & \text{eje 1-1} \\ 0.052xa + 0.1t_f(b-x) & \text{eje 2-2} \end{cases}$$

Fuente: (Budynas y Nisbett, 2012).

- Efecto de la temperatura de operación en la resistencia a la tensión del acero.

Temperatura, °C	S_T/S_{RT}	Temperatura, °F	S_T/S_{RT}
20	1.000	70	1.000
50	1.010	100	1.008
100	1.020	200	1.020
150	1.025	300	1.024
200	1.020	400	1.018
250	1.000	500	0.995
300	0.975	600	0.963
350	0.943	700	0.927
400	0.900	800	0.872
450	0.843	900	0.797
500	0.768	1 000	0.698
550	0.672	1 100	0.567
600	0.549		

Fuente: (Budynas y Nisbett, 2012).

- Factores de confiabilidad correspondientes.

Confiabilidad, %	Variación de transformación z_a	Factor de confiabilidad k_e
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

Fuente: (Budynas y Nisbett, 2012).

Anexo 4. Factor de seguridad por medio del método de Pugsley

Tabla 1.1 Características de factor de seguridad A, B y C.

Característica ^a		B =				
		mb	b	r	p	
A = mb	C = {	mb	1.1	1.3	1.5	1.7
	b	1.2	1.45	1.7	1.95	
	r	1.3	1.6	1.9	2.2	
	p	1.4	1.75	2.1	2.45	
A = b	C = {	mb	1.3	1.55	1.8	2.05
	b	1.45	1.75	2.05	2.35	
	r	1.6	1.95	2.3	2.65	
	p	1.75	2.15	2.55	2.95	
A = r	C = {	mb	1.5	1.8	2.1	2.4
	b	1.7	2.05	2.4	2.75	
	r	1.9	2.3	2.7	3.1	
	p	2.1	2.55	3.0	3.45	
A = p	C = {	mb	1.7	2.15	2.4	2.75
	b	1.95	2.35	2.75	3.15	
	r	2.2	2.65	3.1	3.55	
	p	2.45	2.95	3.45	3.95	

^a mb = muy bien, b = bien, r = regular y p = pobre.
 A = calidad de los materiales, mano de obra, mantenimiento e inspección.
 B = control sobre la carga aplicada a la parte.
 C = exactitud del análisis de esfuerzos, de la información experimental o de la experiencia con partes similares.

Tabla 1.2 Características del factor de seguridad D y E.

Característica ^a		D =		
		ns	s	ms
E = {	ns	1.0	1.2	1.4
	s	1.0	1.3	1.5
	ms	1.2	1.4	1.6

^a ms = muy serio, s = serio y ns = no serio.
 D = peligro para el personal.
 E = impacto económico.

Fuente: (Hamrock et al., 2000).

Anexo 5. Factor se servicio

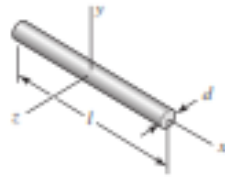
Máquina Movida	Máquina Motriz					
	Motor eléctrico sincrónico. Motor de combustión interna multicilindro. Turbinas.			Motor eléctrico de alto par. Motor de combustión interna monocilindro.		
	8 h/día	16 h/día	24 h/día	8 h/día	16 h/día	24 h/día
<u>Carga ligera</u> Agitadores de líquidos. Bombas y compresores centrífugos. Transportadores de banda. Ventiladores. Máquinas herramientas de corte continuo.	1.0	1.1	1.2	1.1	1.2	1.3
<u>Carga normal</u> Bombas y compresores de 3 y más cilindros. Transportadores de cadena. Fresadoras.	1.1	1.2	1.3	1.2	1.3	1.4
<u>Carga pesada</u> Bombas y compresores de uno y dos cilindros. Elevadores de cangilones. Cepilladoras y mortajadoras.	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6
<u>Carga muy pesada</u> Mecanismos de elevación de grúas. Prensas. Cizallas.	1.3	1.4	1.5	1.5	1.6	1.8

Fuente: (González Rey et al.).

Anexo 6. Propiedades geométricas de sólidos

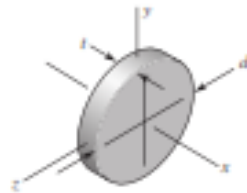
Parte 2 Propiedades de sólidos (ρ = densidad, peso por unidad de volumen)

Varillas



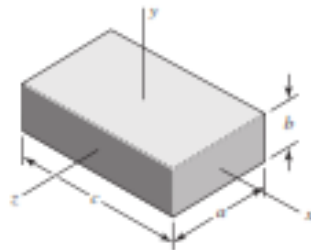
$$m = \frac{\pi d^2 l \rho}{4g} \quad I_y = I_z = \frac{ml^2}{12}$$

Discos redondos



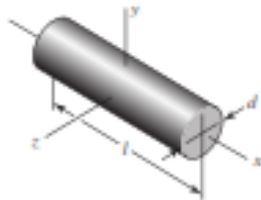
$$m = \frac{\pi d^2 t \rho}{4g} \quad I_x = \frac{md^2}{8} \quad I_y = I_z = \frac{md^2}{16}$$

Prismas rectangulares



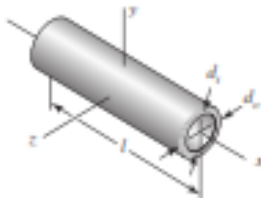
$$m = \frac{abc\rho}{g} \quad I_x = \frac{m}{12}(a^2 + b^2) \quad I_y = \frac{m}{12}(a^2 + c^2) \quad I_z = \frac{m}{12}(b^2 + c^2)$$

Cilindros



$$m = \frac{\pi d^2 l \rho}{4g} \quad I_x = \frac{md^2}{8} \quad I_y = I_z = \frac{m}{48}(3d^2 + 4l^2)$$

Cilindros huecos



$$m = \frac{\pi (d_o^2 - d_i^2) l \rho}{4g} \quad I_x = \frac{m}{8} (d_o^2 + d_i^2) \quad I_y = I_z = \frac{m}{48} (3d_o^2 + 3d_i^2 + 4l^2)$$

Fuente: (Budynas y Nisbett, 2012).

Anexo 7. Rodamientos FAG

-Capacidades de carga de rodamientos rígidos de bolas 6203.

Capacidad de carga		Velocidad límite	Velocidad de referencia	Denominación abreviada
dyn. C	stat. C ₀			
kN		min ⁻¹		Rodamiento FAG
7,8	3,75	26000	24000	6202
7,8	3,75	26000	24000	S6202.W203B
7,8	3,75	20000	24000	6202.2ZR
7,8	3,75	14000		6202.2RSR
7,8	3,75	14000		S6202.2RSR.W203B
7,8	3,75	14000		62202.2RSR
11,4	5,4	43000	22000	6302
11,4	5,4	43000	22000	S6302.W203B
11,4	5,4	18000	22000	6302.2ZR
11,4	5,4	12000		6302.2RSR
11,4	5,4	12000		S6302.2RSR.W203B
11,4	5,4	12000		62302.2RSR
6	3,25	28000	20000	16003
6	3,25	28000	22000	6003
6	3,25	28000	22000	S6003.W203B
6	3,25	22000	22000	6003.2ZR
6	3,25	14000		6003.2RSR
6	3,25	14000		S6003.2RSR.W203B
9,5	4,75	22000	20000	6203
9,5	4,75	22000	20000	S6203.W203B
9,5	4,75	18000	20000	6203.2ZR
9,5	4,75	12000		6203.2RSR
9,5	4,75	12000		S6203.2RSR.W203B

Fuente: (Rodamientos FAG).

-Factores radiales y axiales de los rodamientos rígidos de bolas.

Juego normal de rodamiento				
e	$\frac{F_a}{F_r} \leq e$		$\frac{F_a}{F_r} > e$	
	X	Y	X	Y
0,22	1	0	0,56	2
0,24	1	0	0,56	1,8
0,28	1	0	0,56	1,58
0,32	1	0	0,56	1,4
0,36	1	0	0,56	1,2
0,43	1	0	0,56	1

Fuente: (Rodamientos FAG).

Anexo 8. Consideraciones de pernos

-Diámetros y áreas de roscas de tornillos UNC y UNF.

Tabla 8-2

Diámetros y área de roscas unificadas de tornillo UNC y UNF*









Designación de tamaño	Diámetro mayor nominal	Serie gruesa-UNC			Serie fina-UNF		
		Roscas por pulgada, N	Área de esfuerzo de tensión A_t , pulg ²	Área del diámetro menor A_r , pulg ²	Roscas por pulgada, N	Área de esfuerzo de tensión A_t , pulg ²	Área del diámetro menor A_r , pulg ²
0	0.0600				80	0.001 80	0.001 51
1	0.0730	64	0.002 63	0.002 18	72	0.002 78	0.002 37
2	0.0860	56	0.003 70	0.003 10	64	0.003 94	0.003 39
3	0.0990	48	0.004 87	0.004 06	56	0.005 23	0.004 51
4	0.1120	40	0.006 04	0.004 96	48	0.006 61	0.005 66
5	0.1250	40	0.007 96	0.006 72	44	0.008 80	0.007 16
6	0.1380	32	0.009 09	0.007 45	40	0.010 15	0.008 74
8	0.1640	32	0.014 0	0.011 96	36	0.014 74	0.012 85
10	0.1900	24	0.017 5	0.014 50	32	0.020 0	0.017 5
12	0.2160	24	0.024 2	0.020 6	28	0.025 8	0.022 6
$\frac{1}{4}$	0.2500	20	0.031 8	0.026 9	28	0.036 4	0.032 6
$\frac{5}{16}$	0.3125	18	0.052 4	0.045 4	24	0.058 0	0.052 4
$\frac{3}{8}$	0.3750	16	0.077 5	0.067 8	24	0.087 8	0.080 9
$\frac{7}{16}$	0.4375	14	0.106 3	0.093 3	20	0.118 7	0.109 0
$\frac{1}{2}$	0.5000	13	0.141 9	0.125 7	20	0.159 9	0.148 6
$\frac{9}{16}$	0.5625	12	0.182	0.162	18	0.203	0.189
$\frac{5}{8}$	0.6250	11	0.226	0.202	18	0.256	0.240
$\frac{3}{4}$	0.7500	10	0.334	0.302	16	0.373	0.351
$\frac{7}{8}$	0.8750	9	0.462	0.419	14	0.509	0.480
1	1.0000	8	0.606	0.551	12	0.663	0.625
$1\frac{1}{4}$	1.2500	7	0.969	0.890	12	1.073	1.024
$1\frac{1}{2}$	1.5000	6	1.405	1.294	12	1.581	1.521

Fuente: (Budynas y Nisbett, 2012).

-Especificaciones SAE para pernos de acero.

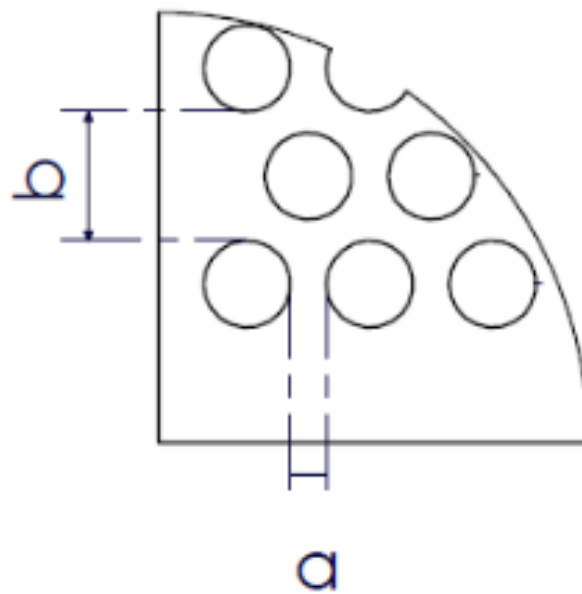
Tabla 8-9

Especificaciones SAE para pernos de acero

Grado SAE núm.	Intervalo de tamaños, inclusive, pulg	Resistencia de prueba mínima,* kpsi	Resistencia mínima a la tensión,* kpsi	Resistencia mínima a la fluencia,* kpsi	Material	Marca en la cabeza
1	$\frac{1}{4}$ a $1\frac{1}{2}$	33	60	36	Acero de bajo o medio carbono	
2	$\frac{1}{4}$ a $\frac{3}{4}$ $\frac{7}{8}$ a $1\frac{1}{2}$	55 33	74 60	57 36	Acero de bajo o medio carbono	
4	$\frac{1}{4}$ a $1\frac{1}{2}$	65	115	100	Acero de medio carbono, estirado en frío	
5	$\frac{1}{4}$ a 1 $1\frac{1}{8}$ a $1\frac{1}{2}$	85 74	120 105	92 81	Acero de medio carbono, T y R	
5.2	$\frac{1}{4}$ a 1	85	120	92	Acero martensítico de bajo carbono, T y R	
7	$\frac{1}{4}$ a $1\frac{1}{2}$	105	133	115	Acero de aleación de medio carbono, T y R	
8	$\frac{1}{4}$ a $1\frac{1}{2}$	120	150	130	Acero de aleación de medio carbono T y R	
8.2	$\frac{1}{4}$ a 1	120	150	130	Acero martensítico de bajo carbono, T y R	

Fuente: (Budynas y Nisbett, 2012).

Anexo 9. Dimensiones para agujeros en cribas para clasificación de café



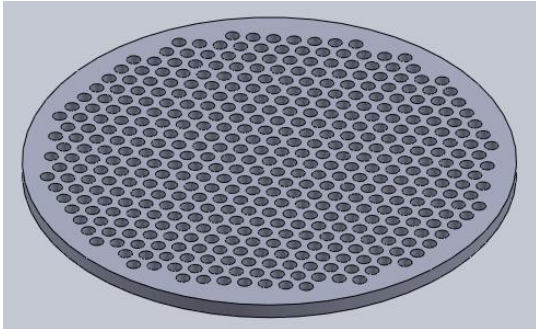
Nro.	Diámetro (mm)	a	b
12	4,5	2,2	6,8
13	5,0	2,0	7,2
14	5,4	2,3	8,0
15	5,8	2,4	8,6
16	6,2	2,3	8,6
17	6,6	2,0	9,0
18	7,0	2,4	9,2

Fuente: (Lafebre Álvares, 2019).

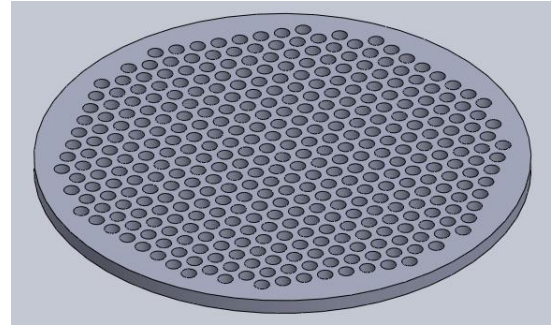
Anexo 10. Proceso de construcción de cribas

-Modelado de 3D de cribas (Distribución de agujeros para un diámetro de 160 mm con un espesor de 5 mm).

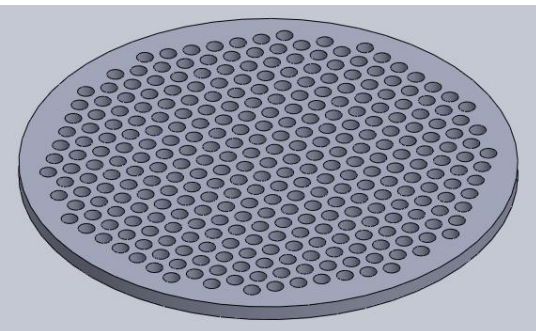
Criba Nro. 12



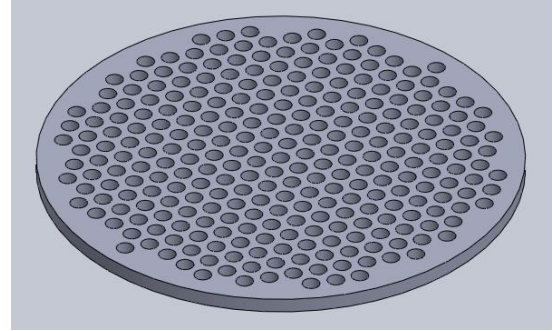
Criba Nro. 13



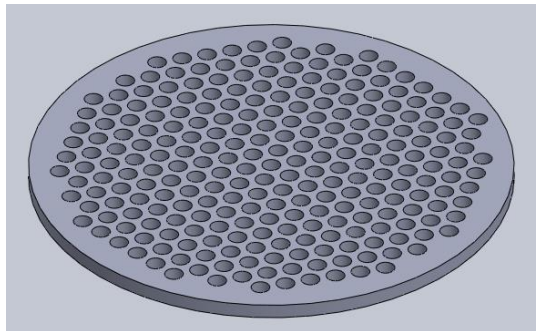
Criba Nro. 14



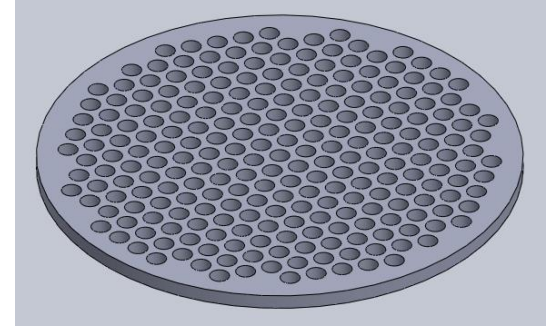
Criba Nro. 15



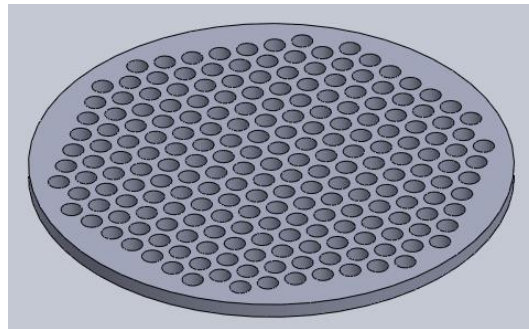
Criba Nro. 16



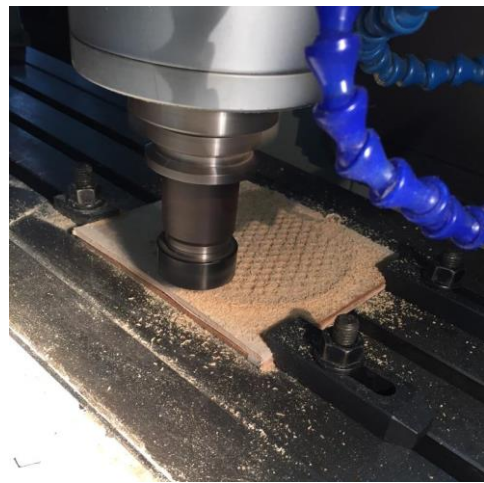
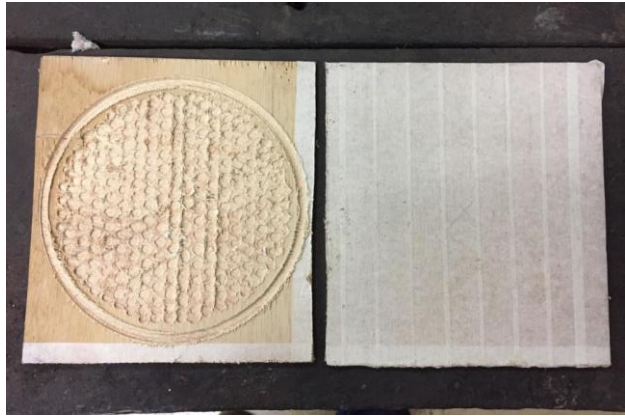
Criba Nro. 17



Criba Nro. 18



-Mecanizado de las cribas.



-Clasificación por tamaño con las cribas.



Anexo 11. Matriz de selección, para definir el tipo de máquina densimétrica

1. CRITERIOS Y EVALUACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO DE CADA CRITERIO

1 = Más importante (que la columna) 0,5 = igual importante 0 = menos importante (que la columna)	Tamaño	Clasificación de los granos de café	Capacidad	Facilidad de fabricación y manufactura	Consumo energético	Facilidad de mantenimiento	$\Sigma+1$	Ponderación (PC)
Tamaño		0	0,5	0,5	0	0	1	0,067
Clasificación de los granos de café	1		1	0,5	1	0,5	4	0,267
Capacidad	0,5	0		0,5	1	0,5	2,5	0,167
Facilidad de fabricación y manufactura	0,5	0,5	0,5		1	0,5	3	0,200
Consumo energético	1	0	0	0		0	1	0,067
Facilidad de mantenimiento	1	0,5	0,5	0,5	1		3,5	0,233
						SUMA	15	1

2. IDENTIFICACIÓN DE ALTERNATIVAS A ELEGIR

Marca comercial	Modelo/Denominación	Código
ZACCARIA	MDZ-120	MD-1
SRRAI	SRRAI-TRACTOR-MOTOR	MD-2
SOLOCAFÉ	SC-CAN40	MD-3

3. MATRIZ DE SELECCIÓN, MEJOR ALTERNATIVA

Valoraciones				
1	2	3	4	5
Muy bajo	Bajo	Medio	Bueno	Muy bueno

	Peso del criterio	MD-1		MD-2		MD-3	
		Valoración	Puntaje	Valoración	Puntaje	Valoración	Puntaje
Tamaño	0,067	4	0,267	3	0,200	3	0,200
Clasificación de los granos de café	0,267	5	1,333	4	1,067	4	1,067
Capacidad	0,167	4	0,667	3	0,500	4	0,667
Facilidad de fabricación y manufactura	0,200	5	1,000	4	0,800	5	1,000
Consumo energético	0,067	3	0,200	3	0,200	4	0,267
Facilidad de mantenimiento	0,233	4	0,933	3	0,700	4	0,933
	1,000		4,400		3,467		4,133

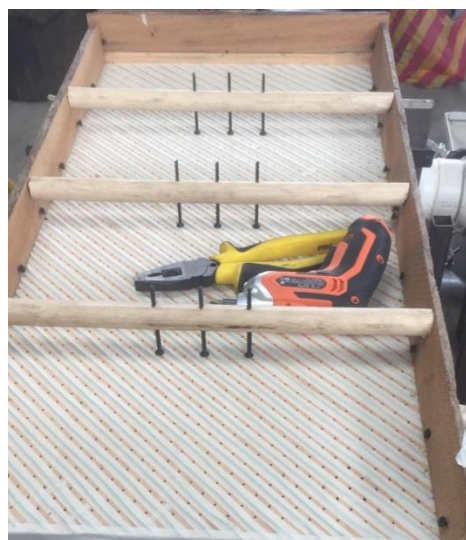
4. RESULTADO DE LA COMPARACIÓN

	PUNTAJE	PRIORIDAD
MD-1	4,400	1
MD-2	3,467	3
MD-3	4,133	2

MEJOR OPCIÓN **MD-1**

Anexo 12. Proceso de construcción del prototipo experimental

-Caja de madera.



-Soportes y bastidor.



-Tolva.



-Paletas móviles.



-Eje excéntrico y biela.





-Prototipo experimental armado.



Anexo 13. Parámetros de operación de la máquina densimétrica

DATOS										RESULTADOS								Diferencia entre		
										Basado en un volumen de 355 cm ³								M3 - M1	M2 - M1	M3 - M2
Frecuencia de motor		Amplitud de oscilación		Inclinación α		Inclinación β		Flujo de aire		Capacidad de clasificación		Muestra de salida 1 (M1)		Muestra de salida 2 (M2)		Muestra de salida 3 (M3)				
Hz	rpm	mm	m	cm	°	cm	°	Qi	m/s	Kg/s	qq/h	g	Kg	g	Kg	g	Kg	g	g	g
4,9	272	10	0,01	1	0,49	1	0,98	cerrado	1,7	0,016	1,23	285	0,285	289	0,289	289	0,289	4	4	0
4,95	276	10	0,01	1	0,49	1	0,98	cerrado	1,7	0,019	1,51	287	0,287	292	0,292	292	0,292	5	5	0
5	279	10	0,01	1	0,49	1	0,98	cerrado	1,7	0,021	1,65	284	0,284	292	0,292	292	0,292	8	8	0
5,05	282	10	0,01	1	0,49	1	0,98	cerrado	1,7	0,022	1,77	283	0,283	290	0,29	293	0,293	10	7	3
5,1	284	10	0,01	1	0,49	1	0,98	cerrado	1,7	0,023	1,79	286	0,286	291	0,291	291	0,291	5	5	0
4,9	272	10	0,01	1	0,49	1,5	1,94	cerrado	1,7	0,024	1,91	286	0,286	290	0,29	291	0,291	5	4	1
4,95	276	10	0,01	1	0,49	1,5	1,94	cerrado	1,7	0,024	1,93	284	0,284	290	0,29	292	0,292	8	6	2
5	279	10	0,01	1	0,49	1,5	1,94	cerrado	1,7	0,025	1,98	287	0,287	289	0,289	292	0,292	5	2	3
5,05	282	10	0,01	1	0,49	1,5	1,94	cerrado	1,7	0,028	2,21	286	0,286	293	0,293	295	0,295	9	7	2
5,1	284	10	0,01	1	0,49	1,5	1,94	cerrado	1,7	0,031	2,48	286	0,286	291	0,291	291	0,291	5	5	0
4,9	272	10	0,01	1	0,49	0,5	0,03	cerrado	1,7	0,030	2,39	287	0,287	289	0,289	293	0,293	6	2	4
4,95	276	10	0,01	1	0,49	0,5	0,03	cerrado	1,7	0,035	2,74	284	0,284	287	0,287	292	0,292	8	3	5
5	279	10	0,01	1	0,49	0,5	0,03	cerrado	1,7	0,032	2,51	289	0,289	289	0,289	293	0,293	4	0	4
5,05	282	10	0,01	1	0,49	0,5	0,03	cerrado	1,7	0,032	2,55	290	0,29	289	0,289	291	0,291	1	-1	2
5,1	284	10	0,01	1	0,49	0,5	0,03	cerrado	1,7	0,037	2,91	288	0,288	287	0,287	292	0,292	4	-1	5

Anexo 14. Detalles del acero de transmisión AISI 1018

EJES

EJES

ACERO DE TRANSMISIÓN

Especificaciones Generales:

Norma: AISI 1018

Descripción: Es un acero de cementación no aleado principalmente utilizado para la elaboración de piezas pequeñas, exigidas al desgaste y donde la dureza del núcleo no es muy importante.

Aplicaciones: Levas uniones, bujes, pines, pivotes, pernos grado 3.

Largo: 6 mts




COMPOSICIÓN QUÍMICA				
%C	%Si	%Mn	%P	%S
0 - 0,20	0 - 0,25	0 - 0,70	0 - 0,04	0 - 05

PROPIEDADES MECÁNICAS			
RESISTENCIA MECÁNICA (N/mm ²)	PUNTO DE FLUENCIA (N/mm ²)	Elongación % Min.	DUREZA ROCKWELL B
410 - 520	235	20	143

DIMENSIONES	
DIÁMETRO	
3/8"	
1/4"	
5/8"	
3/4"	
7/8"	
1"	
1-1/4"	
1-1/2"	
1-3/4"	
2"	
2-1/4"	
2-1/2"	
2-3/4"	
3"	
3-1/2"	
4"	
4-1/2"	
5"	
6"	

50

Fuente: (DIPAC, 2022).

Las propiedades físicas del acero al carbono AISI 1018 se muestran a continuación.

Propiedades	Métrico	Imperial
Densidad	7,87 g / cm ³	0,284 lb / pulg. ³

Fuente: (Waldunsteel, 2022).

Anexo 15. Detalles del acero inoxidable AISI 304

ACERO INOXIDABLE

PLANCHAS ACERO INOXIDABLE

Norma: AISI 304

Especificaciones Generales:

ESPEORES	desde 0,40-15mm
DIMENSIONES	1220 x 2440mm (estándar) 1220 x otros largos (especial)

DESCRIPCIÓN DE ACUERDO A NORMA	IS	SUS 304
	ASTM	304
	DIN	4301



Descripción: Acero inoxidable aleado al cromo y níquel, muy resistente a la corrosión intergranular y a los ataques químicos del medio ambiente. Posee una buena resistencia a la corrosión del agua, ácidos y soluciones alcalinas si se emplea con superficie pulida a espejo. Se la puede encontrar con acabado ASTM 2B y 1.

COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)								
C Max	Si Max	Mn	P Max	S Max	Ni	Cr	Mo	Otros
0,08	1	2	0,04	0,03	8 - 10,5	18 - 20	XX	XX

PROPIEDADES MECÁNICAS						
RESISTENCIA MECÁNICA		PUNTO DE FLUENCIA		Elongación % Min.	PRUEBAS DE DUREZA (MAX)	
Kg/mm ²	Psi	Kg/mm ²	Psi		ROCKWELL B	VICKERS
49	69500	18	25500	40	81,7	160

Norma: AISI 201

Especificaciones Generales:

ESPEORES	desde 0,70-3mm
DIMENSIONES	1220 x 2440mm (estándar) 1220 x otros largos (especial)

DESCRIPCIÓN DE ACUERDO A NORMA	IS	SUS 201
	ASTM	201
	DIN	3003



Es un acero al cromo, manganeso, níquel con excelentes propiedades de tensión. Ofrece buena resistencia a la corrosión y a muchos agentes corrosivos moderados.

56

Fuente: (DIPAC, 2022).

Acero 304 Propiedades Mecánicas

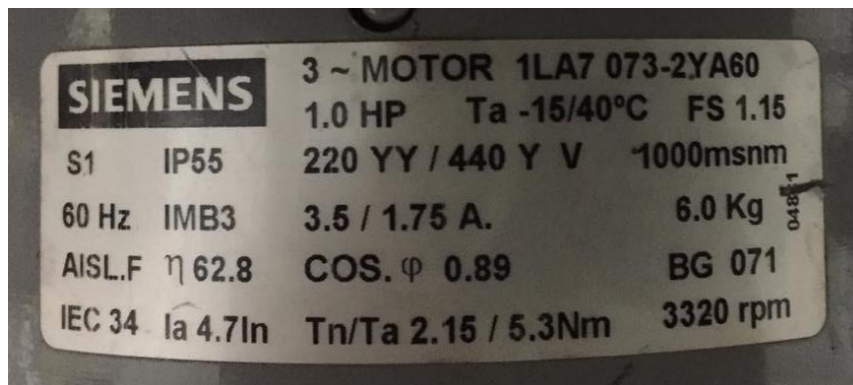
Densidad

7.93 g/cm³

Fuente: (Mundial, 2023).

Anexo 16. Motor trifásico y variador de frecuencia

-Datos en placa del motor.



- Datos de motor sugerido

	Nr.:				
	Fecha: 24-AGO-2023				
HOJA DE DATOS Motor trifásico de inducción - Rotor de jaula					
Cliente	:				
Línea del producto	: W22 Carcasa de Hierro Gris - Premium Efficiency - IE3				
Carcasa	: 80				
Potencia	: 0,18 kW				
Frecuencia	: 60 Hz				
Polos	: 8				
Rotación nominal	: 850 rpm				
Deslizamiento	: 5,56 %				
Voltaje nominal	: 220/380/440 V				
Corriente nominal	: 1,19/0,689/0,595 A				
Corriente de arranque	: 4,17/2,41/2,08 A				
Ip/In	: 3,5				
Corriente en vacío	: 1,04/0,600/0,518 A				
Par nominal	: 2,02 Nm				
Par de arranque	: 200 %				
Par máxima	: 220 %				
Categoría	: ---				
Clase de aislación	: F				
Elevación de temperatura	: 80 K				
Tiempo de rotor bloqueado	: 52 s (caliente)				
Factor de servicio	: 1,25				
Régimen de servicio	: S1				
Temperatura ambiente	: -20°C - +40°C				
Altitud	: 1000 m				
Protección	: IPW55				
Masa aproximada	: 12 kg				
Momento de inercia	: 0,00270 kgm²				
Nivel de ruido	: 46 dB(A)				
Rodamiento	Delantero 6204 ZZ	Trasero 6203 ZZ	Carga	Factor de potencia	Rendimiento (%)
Intervalo de lubricación	---	---	100%	0,62	64,0
Cantidad de grasa	---	---	75%	0,53	57,0
			50%	0,42	51,0

Fuente: (WEG, 2023).

-Datos en placa del variador de frecuencia.



- Datos de variador de frecuencia sugerido

Especificaciones técnicas

MICROMASTER 420	
Tensión de alimentación	Potencia en par constante
220 V a 240 V 1 CA ± 10%	1/6 HP a 4 HP
200 V a 240 V 3 CA ± 10%	1/6 HP a 7.5 HP
380 V a 480 V 3 CA ± 10%	1/2 HP a 15 HP
Frecuencia de entrada	47 Hz a 63 Hz
Frecuencia de salida	0 Hz a 650 Hz
Factor de potencia	≥ 0.95
Eficiencia del convertidor	96 % a 97 %

MICROMASTER 420 Tabla de selección

Potencia	Corriente entrada	Corriente salida	Tamaño	Tipo	Micromaster 420 sin filtro
kW	HP	A	A		
Tensión alimentación (200-240 V) ± 10% 1ø/3ø					
0.12	0.16	0.7	0.9	A	6SE64202UC112AA1
0.25	0.33	1.7	1.7	A	6SE64202UC125AA1
0.37	0.50	2.4	2.3	A	6SE64202UC137AA1
0.55	0.75	3.1	3.0	A	6SE64202UC155AA1
0.75	1.0	4.3	3.9	A	6SE64202UC175AA1

Fuente: (Siemens Mexico).

Anexo 17. Sistema de generación de aire

-Vista general del sistema de generación de aire.



-Datos de placa del soplante.



-Soplante te Blower de 4".



-Reductor de 4" a 3" de PVC.



-Codo de 3" se PVC.



-Manguera flexible de 3".



-Recamara donde se aloja el aire (mesa).



-Agujeros de salida de aire (mesa).



Anexo 18. Costos de materiales, partes y piezas para su construcción

-Costo de materiales partes y piezas.

Materiales, partes y piezas	Cantidad	C. Unitario (USD)	Subtotal (USD)
Tubo estructural cuadrado de 30 mm de ancho y espesor de 1,5 mm (6 m)	1,5 U	10,80	16,20
Tubo estructural cuadrado de 25 mm de ancho y espesor de 2 mm (6 m)	1 m	11,00	1,83
Tubo estructural cuadrado de 20 mm de ancho y espesor de 2 mm (6 m)	1 m	9,90	1,65
Plancha de acero galvanizado de 0,7 mm (122*224 cm)	¼ de plancha	24,20	6,05
Plancha de acero inoxidable ANSI 304 de 4 mm (122*244 cm)	4 tiras de 5*40 cm	223,90	6,01
Placa de acero de 8 mm (15*15 cm)	1 U	1,20	1,20
Eje de acero de transmisión de 1 ½” (6 m)	45 cm	22,50	1,69
Eje de grilón de diámetro de 1” * 5 cm de largo	1 U	1,00	1,00
Pletina de 12*4 mm (6 m)	1 m	3,20	0,53
Pletina de 19*4 mm (6 m)	20 cm	5,10	0,17
Pletina de 19*3 mm (6 m)	10 cm	3,60	0,06
Pletina de 30*3 mm (6 m)	1,5 m	9,90	2,48
Ángulo de 20*2 mm (6 m)	1,5 m	5,10	1,28
Ángulo de 25*3 mm (6 m)	1,6 m	7,95	2,12
Ángulo de 30*3 mm (6 m)	2,5 m	9,75	4,06
Ángulo de 40*4 mm (6 m)	50 cm	17,55	1,46
Remache 3/16” de diámetro y ½” de largo	32 U	0,02	0,64
Tornillo para MDF de UNC de 2”	9 U	0,02	0,18
Tornillo para MDF de UNC de 1 1/4”	41 U	0,02	0,82
Regatón cuadrado de 25 mm	2 U	0,25	0,50
Regatón cuadrado de 30 mm	4 U	0,30	1,20
Electrodos E-6011 (1 kg)	1 U	3,10	3,10
Perno M6*20 mm	22 U	0,08	1,76
Perno M6*25 mm	14 U	0,08	1,12
Perno M6*50 mm	4 U	0,15	0,60
Perno M8*20 mm	7 U	0,15	1,05

Perno M8*50 mm	10 U	0,25	2,50
Perno UNC de 3/8" * 1"	2 U	0,15	0,30
Perno UNC de 3/8" * 3/4"	2 U	0,15	0,30
Perno UNC de 3/8" * 5"	1 U	0,40	0,40
Perno UNC de 1/2" * 2"	5 U	0,40	2,00
Tuerca M6	40 U	0,02	0,80
Tuerca M8	11 U	0,05	0,55
Tuerca mariposa M8	7 U	0,20	1,40
Tuerca UNC de 3/8"	9 U	0,05	0,45
Tuerca UNC de 1/2"	5 U	0,10	0,50
Arandela de 6 mm diámetro interior * 20 mm de diámetro exterior * 2 mm de espesor	40 U	0,05	2,00
Arandela de M8 diámetro interior * 24 mm de diámetro exterior * 2 mm de espesor	12 U	0,05	0,60
Arandela plana de 1/2" diámetro interior * 1 1/2" de diámetro exterior * 2 mm de espesor	8 U	0,10	0,80
Arandela plana de 3/8" diámetro interior * 24 mm de diámetro exterior * 2 mm de espesor	2 U	0,05	0,10
Arandela de presión de 1/2"	9 U	0,10	0,90
Rodamiento de bolas de 6203	2 U	5,00	10,00
Listón de madera (Pino) de 12 mm * 60 mm * 3 m	1 U	3,00	3,00
Tabla de madera (Seike) de 17 mm * 16 cm * 3 m	1 U	10,00	10,00
Palo de escoba	1 U	2,00	2,00
Plywood de 4 mm (80*40 cm)	1 U	4,50	4,50
Plywood de 9 mm (81*42,5 cm)	1 U	8,50	8,50
Nylon N° 6 (Rollo de 200 g)	1 U	2,00	2,00
Cinta masking de 12 mm	1 U	1,30	1,30
Cinta masking de 24 mm	1 U	1,50	1,50
Codo PVC de 3"	1 U	8,25	8,25
Tubo PVC de 3" (3 m)	60 cm	2,50	0,50
Reducción de tubo PVC de 4" a 3"	1 U	3,50	3,50
Manguera flexible negra de 3" * 40 cm	1 U	15,00	15,00
Soplante de fragua eléctrica blower de 550 W (4" de diámetro)	1 U	137,00	137,00
Motor trifásico Siemens de 3220 rpm	1 U	120,00	120,00

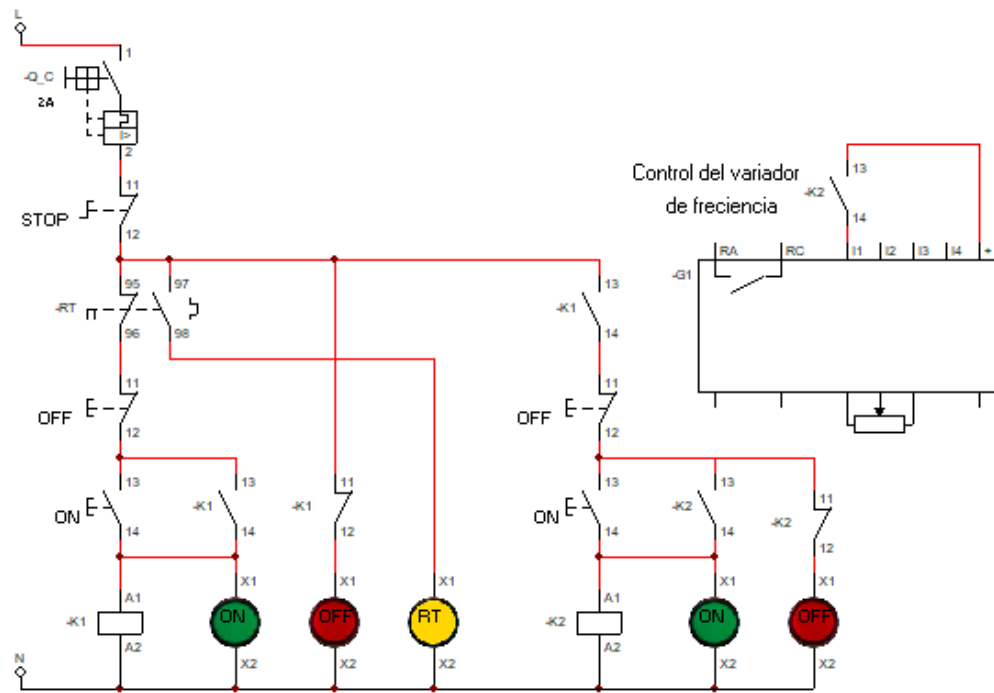
Variador de frecuencia LCIS de tres fases de 0,1-400 Hz con potencia de 4,5K VA	1 U	100,00	100,00
Ventilador de 12,5*12,5 cm de 110 V	1 U	11,70	11,70
Cable concéntrico 3*14 AWG (m)	6 m	2,40	14,40
Cable concéntrico 3*12 AWG (m)	2 m	2,90	5,80
Enchufe polarizado	1 U	2,50	2,50
Prensas de estopa ½"	1 U	0,60	0,60
Prensas de estopa 1"	3 U	1,50	4,50
Terminales de orqueta de 22-18 AWG	20 U	0,10	2,00
Terminales de orqueta de 16-14 AWG	30 U	0,10	3,00
Terminales de ojo de 16-14 AWG	3 U	0,10	0,30
Forro de tapiz (25*50 cm)	1 U	15,00	15,00
Cola blanca de 250 ml	1 U	1,50	1,50
¼ gal Barniz	1 U	7,50	7,50
¼ gal tinte de madera color cerdo	1 U	11,25	11,25
¼ gal de pintura gris arena	1 U	6,00	6,00
Diluyente (L)	2 L	1,50	3,00
Luz piloto verde	1 U	2,00	2,00
Luz piloto rojo	1 U	2,00	2,00
Contactador de 3 polos	1 U	10,00	10,00
Pulsadores NC y NO	1 U	7,00	7,00
Pulsador de parda de emergencia	1 U	5,00	5,00
Cable THHN calibre 16 AWG	3 m	0,30	0,90
Cable THHN calibre 14 AWG	1 m	0,40	0,40
Cable THHN calibre 12 AWG	3 m	0,60	1,80
Breaker de 1P 6 A	2 U	4,00	8,00
Breaker de 2P 6 A	1 U	6,00	6,00
Caja de 40*30 cm	1 U	44,00	44,00
Tope de riel din	2 U	0,25	0,50
Bornera de riel din	3 U	0,65	1,95
Riel din	20 cm	1,70	0,34
Imprevistos	-	-	30,00
Costo de materiales (USD)			708,40

-Costos de proceso de construcción.

PROCESO DE CONSTRUCCIÓN	Costo (USD)
Corte y soldadura del bastidor	80,00
Corte, remachado y soldadura de la tolva	80,00
Corte perforación y doblado para la rampa	30,00
Corte, perforación y doblado de las paletas móviles	20,00
Corte y soldadura para el armado de la biela	60,00
Mecanizado, soldadura y cachueado de eje excéntrico	80,00
Perforaciones y atornillado de la caja de madera	60,00
Corte de los soportes de acero inoxidable	8,00
Armado del accionamiento eléctrico	120,00
Armado de todas los componentes partes y piezas del prototipo	80,00
Pintado del prototipo	20,00
Total	688,00

Anexo 19. Planos

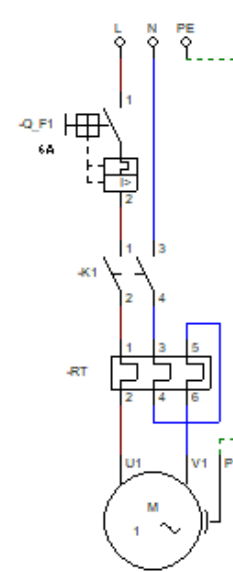
- Planos eléctricos.



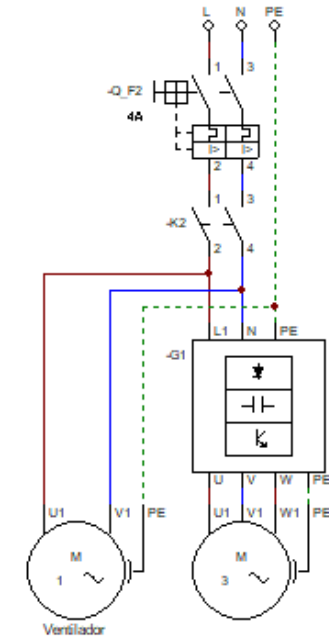
Soplante 550 W

Motor trifásico 1 Hp (746 W)

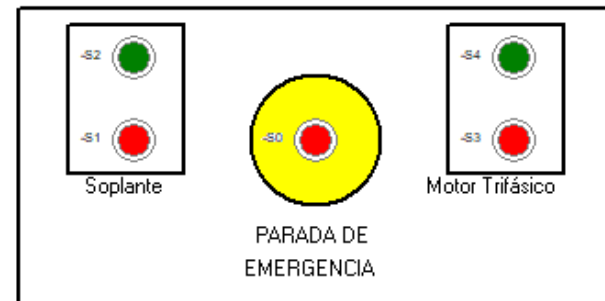
Soplante 550 W



Motor trifásico 1 Hp (746 W)



Ventilador



- Planos mecánico.

<https://drive.google.com/drive/folders/1c3KtS2PGLek4IeqI67zujY2F4xlmMjYu?usp=sharing>

Anexo 20. Certificación de la traducción del resumen

06 de septiembre 2023

Lic. Gabriela del Rocío Enríquez Jadán

A petición de la parte interesada

CERTIFICA

Que la traducción del resumen de la tesis titulada: Diseño y construcción de un prototipo clasificador densimétrico de café, de autoría de **Juan Diego Enríquez Rogel** con cédula de ciudadanía 1105375339 Egresado de la carrera de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional de Loja ha sido debidamente traducido del español al Idioma Inglés

Particular que comunico en honor a la verdad para fines académicos, facultando al portador del presente documento, hacer uso legal pertinente



Gabriela del Rocío Enriquez Jadán

LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN MENCIÓN INGLÉS

NÚMERO REGISTRO SENECYT 1008-15-1426297

1103730980

gabrielaenriquezjadan@yahoo.com
0958874050