UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MECATRÓNICA

PROYECTO APLICADO DE INGENIERÍA

2023-2

# Cortadora UN

*Autores:*
Nicolas D. Avila R.
Cristian A. Castrillon A.
Andrés Holguín R
Daniel F. Mancilla A.
Mariana A. Rodriguez
Juan M. Rubio V.
Juan S. Sanchez M.

*Docentes:*

Carlos A. Narváez T.
Fernando J. Rodriguez

# Índice

**1. Resumen** **1**

**2. Introducción** **2**

**3. Planteamiento del problema** **4**
3.1. PESTAL . . . . . 4
3.1.1. Político . . . . . 4
3.1.2. Económico . . . . . 5
3.1.3. Social . . . . . 6
3.1.4. Tecnológico . . . . . 6
3.1.5. Ambiental . . . . . 6
3.1.6. Legal . . . . . 7

**4. Formulación del proyecto** **9**
4.1. Requerimientos . . . . . 9
4.2. Objetivos . . . . . 9
4.2.1. Objetivo general . . . . . 9
4.2.2. Objetivos específicos . . . . . 9
4.3. Selección de alternativas . . . . . 9
4.3.1. Propuestas y evaluación de alternativas . . . . . 10
4.3.2. Experimentación . . . . . 11
4.4. Aspectos claves del proyecto . . . . . 14
4.4.1. Alcance . . . . . 14
4.4.2. Cronograma . . . . . 14
4.5. Metodología de diseño . . . . . 15

**5. Diseño del sistema de Corte** **16**
5.1. Parámetros iniciales sistema de corte . . . . . 16
5.2. Cuchilla de corte . . . . . 16
5.3. Tuercas de sujeción . . . . . 18
5.4. Transmisión . . . . . 19
5.5. Eje . . . . . 20
5.6. Chumaceras . . . . . 24
5.7. Acople Motor . . . . . 24
5.8. Mecanismos de transferencia de torque . . . . . 25

**6. Diseño del sistema de Alimentación y Transporte** **27**

**7. Diseño del sistema de Control** **31**
7.1. Selección del motor . . . . . 31
7.1.1. Consideraciones Iniciales . . . . . 31
7.1.2. Matriz de Selección . . . . . 32
7.1.3. Cálculos y Selección del Motor . . . . . 32
7.1.4. Selección final . . . . . 34
7.1.5. Controlabilidad y puesta en uso del motor . . . . . 35
7.2. Perfil de velocidad . . . . . 35
7.3. Verificación perfil de velocidad . . . . . 37

**8. Diseño del sistema electrónico** **42**
8.1. Selección de microcontrolador . . . 42
8.2. Programación del sistema . . . 42
8.2.1. Diseño de máquina de estados finitos (MEF) . . . 42
8.2.2. Verificación MEF . . . 45
8.3. Selección de etapa de potencia . . . 48
8.4. Selección de componentes del circuito . . . 50
8.5. Diseño PCBs . . . 51

**9. Diseño del sistema eléctrico** **54**
9.1. Calibre de Cables . . . 54
9.1.1. Consideraciones Iniciales . . . 54
9.1.2. Anális teórico . . . 55
9.1.3. Cálculo Realizado . . . 56
9.1.4. Calibres sistema de control . . . 57
9.1.5. Calibres sistema de potencia . . . 57
9.2. Diseño de tablero de control . . . 57
9.3. Diseño de Human Machine Interface (HMI) . . . 59
9.4. Lista de Componentes . . . 60
9.4.1. Tablero de control . . . 60
9.4.2. Human Machine Interface (HMI) . . . 60

**10. Diseño Estructural** **61**
10.1. Estructura soporte Motor . . . 61
10.1.1. Análisis estructura . . . 61
10.2. Estructura Mesa . . . 65
10.2.1. Pre-proceso: . . . 65
10.2.2. Resultados: . . . 68

**11. Diseño de Uniones** **70**
11.1. Uniones atornilladas del sistema de transporte . . . 70
11.2. Uniones atornilladas del sistema de corte . . . 71
11.3. Uniones soldadas de estructuras . . . 74
11.4. Otras uniones . . . 76
11.5. Algoritmo uniones atornilladas de Shigley . . . 77

**12. Manufactura y fabricación** **79**
12.1. Sistema de corte . . . 79
12.2. Sistema de alimentación y transporte. . . . 81
12.3. Estructuras y control . . . 83
12.4. Ensamble general . . . 85

**13. Validación** **86**
13.1. Sistema de control . . . 86
13.1.1. Funcionamiento MEF . . . 86
13.1.2. PWM entregado . . . 87
13.2. Sistema de corte . . . 88

**14. Conclusiones** **90**

**Referencias** **91**

**A. Análisis de proceso** **92**

**B. Código C implementado en PIC18F4550** **100**

**C. Manual de operación** **105**
C.1. Disposición de los botones . . . . . 105
C.2. Encendido y puesta en marcha . . . . . 105

**D. Manual de Montaje** **110**
D.1. Preparación . . . . . 110
D.2. Posicionamiento y ensamble de ruedas . . . . . 110
D.3. Atornillar parte fija de los rieles a las bases en Y . . . . . 111
D.4. Atornillar parte móvil de rieles a placas intermedias . . . . . 112
D.5. Atornillar placas intermedias (con rieles móviles) al cajón (placas de contacto que vienen soldadas) . . . . . 113
D.6. Colocar manija al cajón . . . . . 113
D.7. Ubicar y atornillar estructura compuerta de salida a la mesa . . . . . 114
D.8. Ensamblar compuerta con los dos soportes en L y atornillarlos a la estructura compuerta 115
D.9. Montar chumaceras en el eje . . . . . 116
D.10. Montar polea mayor en eje . . . . . 116
D.11. Atornillar chumaceras preliminarmente a estructura motor . . . . . 116
D.12. Montar motor en el soporte motor . . . . . 117
D.13. Colocar acople al eje del motor . . . . . 117
D.14. Montar polea menor en acople motor . . . . . 118
D.15. Montar empaques de amortiguamiento y colocar soporte motor en estructura motor . 118
D.16. Montar correa de transmisión entre las poleas . . . . . 119
D.17. Atornillar soporte motor realizando un templado de correa preliminar . . . . . 119
D.18. Ajustar posición de chumaceras hasta que la correa quede centrada en las poleas y apretar . . . . . 120
D.19. Montar y ajustar provisionalmente cuchilla en el eje . . . . . 120
D.20. Montaje estructura motor sobre estructura principal . . . . . 121
D.21. Verificar centrado de cuchilla respecto al cajón (mover estructura motor hasta encontrar la correcta alineación y apretar) . . . . . 121
D.22. Montar y atornillar tablero de control . . . . . 122
D.23. Ensamble tablero de control . . . . . 122
D.24. Ensamble componentes tablero de Botones . . . . . 124
D.25. Ensamble laterales tablero de Botones . . . . . 125
D.26. Montaje tablero de Botones . . . . . 125
D.27. Montaje carcasa . . . . . 126

# Índice de figuras


1. Zonas de producción de banano . . . . . 5
2. Mapa general del cultivo de banano . . . . . 5
3. Matriz de selección sistema de corte . . . . . 10
4. Criterios de evaluación para la matriz de selección sistema de corte . . . . . 10
5. Matriz de selección sistema de transporte y sujeción . . . . . 10
6. Criterios de evaluación para la matriz de selección sistema de transporte y sujeción . 10
7. Toma de mediciones del banano bocadillo . . . . . 11
8. Mediciones del banano bocadillo . . . . . 11
9. Pruebas de corte . . . . . 12
10. Grados de maduración . . . . . 13
11. Segundo filtro matriz de selección sistema de corte . . . . . 13
12. Matriz de selección sistema de transporte y sujeción . . . . . 14
13. Cronograma . . . . . 14
14. Cronograma . . . . . 15
15. Perfil de la cuchilla y fuerzas actuantes [1] . . . . . 17
16. Perfil de la cuchilla y fuerzas actuantes [1] . . . . . 18
17. Diagrama Geométrico de las Cuchillas [3] . . . . . 20
18. Diagrama de Cuerpo Libre del Eje . . . . . 21
19. Distancias entre apoyos y puntos de interés . . . . . 21
20. Cargas y Reacciones . . . . . 21
21. Diagrama de Fuerza Cortante . . . . . 22
22. Diagrama de Momento Flector . . . . . 22
23. Diagrama de Torsor . . . . . 22
24. Diámetro mínimo generado por cálculos estáticos . . . . . 22
25. Factores de Seguridad . . . . . 23
26. Disposición final del eje . . . . . 23
27. Deflexión en el eje X . . . . . 23
28. Deflexión en el eje Y . . . . . 23
29. Pendientes en el eje Y . . . . . 23
30. Pendientes en el eje Y . . . . . 23
31. Velocidad Crítica . . . . . 24
32. Chumaceras SY 25 TF [SKF] . . . . . 24
33. Selección de diámetro de prisionero según eje [9] . . . . . 25
34. Verificación de torque transmitido por el prisionero [9] . . . . . 25
35. Aumento de transferencia de torque según ángulo del segundo prisionero [9] . . . . . 26
36. Matriz de selección material sistema de transporte . . . . . 27
37. Criterios de evaluación para la matriz de selección de material . . . . . 27
38. Matriz de selección rieles . . . . . 28
39. Criterios de evaluación para la matriz de selección de rieles . . . . . 28
40. Esquema geométrico placas en V . . . . . 29
41. Sistema de alimentación y transporte . . . . . 30
42. Posible adaptación de Bandas transportadoras . . . . . 30
43. Matriz de selección motor . . . . . 32
44. Matriz de selección motor . . . . . 32
45. Motor DC 775 eje en D . . . . . 33
46. Plano de motor DC 775 . . . . . 34

47. Vurva de torque aproximado motor DC 775 . . . 34
48. Perfil de voltaje máximo del motor DC 775 . . . 37
49. Modelo de motor DC en Simulink [11] . . . 38
50. Perfil de velocidad angular del motor en Simulink. . . . 39
51. Perfil de aceleración del motor en Simulink. . . . 39
52. Perfil de voltaje del motor en Simulink. . . . 40
53. Perfil de corriente del motor en Simulink. . . . 40
54. Perfil de torque del motor en Simulink. . . . 41
55. Perfil de potencia del motor en Simulink. . . . 41
56. Matriz de selección microcontrolador . . . 42
57. Criterios matriz de selección microcontrolador . . . 42
58. Máquina de estados finitos de la cortadora de bananos . . . 43
59. Simulador del circuito de control en Proteus . . . 45
60. Verificación Etapa 0. Prendiendo la máquina. . . . 46
61. Verificación Etapa 1. Estado de motores bloqueados. . . . 46
62. Verificación Etapa 2. Motores OFF. . . . 47
63. Verificación Etapa 3. Selección de punto de operación. . . . 47
64. Verificación Etapa 4. Motor prendiendo. . . . 48
65. Verificación Etapa 4. Motor prendido. . . . 48
66. Matriz de selección etapa de potencia . . . 49
67. Criterios matriz de selección etapa de potencia . . . 50
68. Esquemático PCB 1 . . . 51
69. Esquemático PCB 2 . . . 51
70. Distribución PCB 1 . . . 53
71. Distribución PCB 2 . . . 53
72. PCB impresas . . . 54
73. Tabla de calibres a partir de la corriente máxima . . . 57
74. Caja de paso seleccionada [13] . . . 58
75. Diseño final *human interface* . . . 60
76. Diagrama cuerpo Libre Estructura de soporte motor . . . 61
77. Algoritmo de enmallado empleado . . . 62
78. Superficies de algoritmo . . . 62
79. Malla sobre placas horizontales . . . 62
80. Malla perfiles en L . . . 62
81. Métrica Skewness Malla . . . 63
82. Notación . . . 64
83. Numeración soporte mesa . . . 64
84. Esfuerzo equivalente de Von Mises Estructura motor . . . 65
85. Dedormaciones Estructura motor . . . 65
86. Notación nodos mesa . . . 66
87. Estructura en Inventor . . . 66
88. Condiciones de Frontera para simulación Inventor . . . 67
89. Deformaciones calculadas para la mesa . . . 68
90. Esfuerzo Equivalente perfiles mesa . . . 68
91. Esfuerzo Cortante Mesa componente . . . 68
92. Esfuerzo cortantes mesa componente . . . 68
93. Esfuerzo Torsional perfiles mesa . . . 69
94. Tipo de soldadura a realizar . . . 75

95. Algoritmo para diseño de uniones atornilladas de Shigley. . . . . 77
96. Algoritmo para diseño de uniones atornilladas de Shigley. . . . . 78
97. Cuchilla de corte . . . . . 79
98. Poleas . . . . . 80
99. Eje y acople . . . . . 80
100. Sistema de corte . . . . . 81
101. Fabricación de pestañas retenedoras . . . . . 82
102. Fabricación Placa de inox para la mesa . . . . . 82
103. Fabricación y unión de pestañas, acople y placas de contacto . . . . . 82
104. Unión de pestañas, acople, placas de contacto y soportes en Y . . . . . 82
105. Ensamble sistema de transporte en etapas finales . . . . . 83
106. Ensamble final sistema de transporte . . . . . 83
107. Estructuras . . . . . 84
108. Caja de mando . . . . . 84
109. Ensamble general . . . . . 85
110. Validación de etapa E0 de la MEF . . . . . 86
111. Validación de etapa E1 de la MEF . . . . . 86
112. Validación de etapa E2 de la MEF . . . . . 86
113. Validación de etapa E3 de la MEF . . . . . 87
114. Validación de etapa E4 de transición del motor de la MEF . . . . . 87
115. Validación de etapa E4 de establecimiento del motor de la MEF . . . . . 87

# Índice de cuadros


1. Resultados de pruebas carga máxima . . . . . 12
2. Resultados de pruebas carga máxima . . . . . 20
3. Tabla de estados y accionamientos de la MEF . . . . . 44
4. Tabla de Coeficientes para el cálculo del ancho de pista . . . . . 52
5. Ancho de pista utilizado . . . . . 52
6. Factores de corrección utilizados . . . . . 56
7. Propiedades de Acero Estructural A36 . . . . . 61
8. Descomposición de Reacciones en ejes ANSYS [Newtons] . . . . . 61
9. Calidad de la celda segun su valor de skewness . . . . . 63
10. Métricas de la Malla creada . . . . . 63
11. Reacciones Estructura motor - Mesa . . . . . 64
12. Distancias para traslación de Fuerzas . . . . . 66
13. Fuerzas y Momentos para simulación estructural . . . . . 66
14. Peso Aproximado Sub-sistemas maquina . . . . . 66
15. Peso Carga de Bananos . . . . . 67
16. Carga en cada viga para simulación . . . . . 67
17. Parámetros iniciales para el cálculo en transporte . . . . . 70
18. Parámetros iniciales para el cálculo en transporte . . . . . 70
19. Parámetros iniciales para el cálculo en transporte . . . . . 71
20. Parámetros iniciales para el cálculo en transporte . . . . . 71
21. Parámetros iniciales para el cálculo en Corte 1 . . . . . 72
22. Parámetros iniciales para el cálculo en corte 1 . . . . . 72
23. Parámetros iniciales para el cálculo en Corte 1 . . . . . 73
24. Parámetros iniciales para el cálculo en Corte 2 . . . . . 73
25. Parámetros iniciales para el cálculo en Corte 2 . . . . . 73
26. Parámetros iniciales para el cálculo en Corte 2 . . . . . 74
27. Resultados de análisis de soldadura . . . . . 76
28. Datos de validación de voltaje entregado . . . . . 88
29. Datos de rpuebas de validación de corte . . . . . 89

# 1. Resumen

La industria nacional bananera contempla, dentro de su producción nacional del tipo bocadillo, un porcentaje de rechazo por no cumplir con los estándares de exportación o distribución nacional. En busca de un mejor aprovechamiento del banano de rechazo, la asociación bananera de Hoya Grande, Tolima, se planteó el objetivo de desarrollar un producto comercializable a partir de la deshidratación de los bananos. Para que la deshidratación sea adecuada, es necesario que la fruta sea cortada a la mitad de forma precisa y cumpliendo con una tasa de corte de 60 kilos por cada 90 minutos, lo cual no se logra satisfacer bajo un esquema manual de producción, con un porcentaje elevado de error y demoras en el procesamiento que conlleva a la oxidación de la fruta. Con el objetivo de cumplir con dichas métricas de producción, y buscando optimizar el proceso productivo actual, el equipo de PAI, en asociación con DISIMAC Systems Solutions, propuso el diseño y manufactura de una cortadora de banano semiautomática como solución al problema de ingeniería. La máquina contempla el desplazamiento manual de la fruta con un mecanismo tipo cajón hacia el borde afilado del disco de corte, contemplando que toda superficie en contacto con el alimento debe cumplir con reglamentación nacional. La cortadora permitirá alcanzar lotes de producción con mejor calidad en el tiempo solicitado, incrementando el valor agregado del producto y otorgando a la asociación bananera una oportunidad de comercializar una parte de su producción anual que anteriormente era desaprovechada e ignorada.

# 2. Introducción

En el contexto de la industria nacional bananera, la optimización de la producción y el aprovechamiento de los bananos que no cumplen con los estándares de exportación o distribución nacional ha sido identificado como un desafío clave. Específicamente, en la producción de bananos de tipo bocadillo, existe un porcentaje significativo de rechazo que podría ser aprovechado de manera más eficiente. La asociación bananera de Hoya Grande, Tolima, se ha propuesto el objetivo de desarrollar un producto comercializable a partir de la deshidratación de estos bananos de rechazo. Sin embargo, para lograr una deshidratación adecuada, es fundamental contar con una máquina que realice el corte de los bananos de manera precisa y cumpla con una tasa de corte de 60 kilos por cada 90 minutos.

Actualmente, el proceso de corte se realiza de forma manual, lo cual no permite alcanzar las métricas de producción establecidas debido a un alto porcentaje de error y demoras en el procesamiento. Estas deficiencias ocasionan la oxidación de la fruta, lo que afecta su calidad y valor comercial. Con el objetivo de superar estos desafíos y optimizar el proceso productivo, el equipo de PAI, en asociación con la empresa DISIMAC Systems Solutions, ha propuesto el diseño y la manufactura de una cortadora de banano semiautomática como solución al problema de ingeniería planteado.

El diseño propuesto contempla un mecanismo tipo cajón, que permite el desplazamiento manual de la fruta hacia el borde afilado del disco de corte. Es fundamental destacar que este diseño debe cumplir rigurosamente con las regulaciones nacionales en términos de seguridad alimentaria e higiene. La implementación de esta cortadora de banano semiautomática permitirá alcanzar lotes de producción con una calidad superior en el tiempo requerido, incrementando así el valor agregado del producto y brindando a la asociación bananera la oportunidad de comercializar una parte de su producción anual que anteriormente era desaprovechada y pasaba desapercibida.

Considerando los desafíos técnicos y de ingeniería involucrados en este proyecto, se debe adoptar un enfoque integral durante el proceso de diseño mecánico y manufactura. Algunos de los aspectos fundamentales que se deben contemplar son:

Análisis de requisitos: Es necesario realizar un análisis exhaustivo de los requisitos funcionales y operativos de la cortadora de banano. Esto incluye determinar la capacidad de corte requerida, la velocidad de producción deseada, las dimensiones y características de la fruta, y los estándares de seguridad e higiene que deben cumplirse.

Diseño mecánico: Durante la etapa de diseño mecánico, se deben considerar diversos aspectos, como la selección de materiales adecuados que cumplan con los requisitos de resistencia y durabilidad, la determinación de la geometría óptima del mecanismo de corte, y el diseño de un sistema de alimentación eficiente y seguro.

Diseño de control: Es esencial desarrollar un sistema de control adecuado para garantizar la precisión y la repetibilidad en el corte de los bananos. Esto puede implicar la implementación de sensores y actuadores que monitoreen y regulen el proceso de corte de manera efectiva.

Consideraciones ergonómicas: Se deben tener en cuenta aspectos ergonómicos para asegurar la comodidad y seguridad de los operadores durante la manipulación de la fruta y el uso de la cortadora. Esto implica el diseño de interfaces intuitivas y seguras, así como la optimización de la accesibilidad y el confort durante la operación.

Fabricación y ensamblaje: Durante la etapa de manufactura, se deben seguir los procedimientos y estándares adecuados para garantizar la calidad y la precisión en la fabricación de las partes y componentes de la cortadora de banano. Asimismo, el ensamblaje debe ser realizado de manera cuidadosa

para asegurar el correcto funcionamiento y la integridad estructural del equipo.

Pruebas y validación: Es fundamental realizar pruebas exhaustivas en cada etapa del proceso de diseño y manufactura para verificar el rendimiento, la eficiencia y la seguridad de la cortadora de banano. Estas pruebas incluyen pruebas de corte en condiciones reales, pruebas de resistencia y durabilidad, y pruebas de seguridad e higiene.

En resumen, el diseño y la manufactura de una cortadora de banano semiautomática para la asociación bananera de Hoya Grande, Tolima, presenta desafíos técnicos y de ingeniería que deben abordarse de manera integral. Considerando los aspectos mencionados anteriormente, se busca desarrollar una solución eficiente, segura y rentable que permita optimizar la producción de bananos deshidratados a partir de los bananos de rechazo. Al lograr esto, se generará un valor agregado para la asociación bananera, al aprovechar una parte de su producción que anteriormente se desperdiciaba.

# 3. Planteamiento del problema

Cortar longitudinalmente a la mitad bananos tipo bocadillo, con cáscara, producidos en la vereda Hoya Grande, Tolima, en un nivel de maduración 6-7, según la escala de Von Loesecke, mediante el prototipado de una máquina semiautomática que permita mejorar el tiempo actual del proceso de producción, para así evitar la oxidación de la fruta. El tiempo de procesamiento de un lote de 60 kg debe ser inferior a 90 minutos. En cuanto a la tolerancia, se tiene como referencia que una mitad no debería superar el 55 % del espesor del banano original, sin embargo, esto no hará que se descarte la fruta en caso de no cumplirse. Además, el prototipo debe contar con los mecanismos necesarios para poder adaptarse a las distintas geometrías, tamaños de los bananos, contar con unas dimensiones que permitan su instalación en el laboratorio 100 de ingeniería agrícola y estar pensado para futuras adaptaciones a cadenas de producción más grandes. También se debe cumplir con el artículo 9 de la Resolución 2674 de 2013, que habla sobre equipos y utensilios para manejo de alimentos. Por último, se cuentan con recursos de tiempo y dinero limitados, siendo el primero de cuatro meses, y el segundo de 4 millones de pesos colombianos.

## 3.1. PESTAL

### 3.1.1. Político

Para apoyar el control de la sigatoka negra en el cultivo de banano, el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural destinará $3.000 millones. Esta plaga, conocida como raya negra de la hoja, ataca la producción de musáceas (plátano y banano).

De igual manera, mencionó que, “en lo corrido de 2022 (enero-febrero 2022), las exportaciones colombianas de banano sumaron US$136,8 millones, presentando una variación de 17,8 % frente al mismo periodo de 2021 (US$116,1 millones)”.

Otro sector que destaca por su incremento presupuestal es el agro, con un aumento de 73,4 %. El proyecto estima una adición neta de $3 billones a los $4,09 billones que se aprobaron en 2022, con lo que el sector totalizaría $7,1 billones.

El Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural hizo un llamado urgente a los productores y exportadores del sector agropecuario para cumplir con la nueva normativa de la Unión Europea sobre el uso de pesticidas y plaguicidas químicos en las cadenas de producción. No acatar estos lineamientos podría generar afectaciones en un mercado que para octubre de 2022 había comprado USD 2.216 millones en productos agropecuarios colombianos.

Colombia produce el 3 % del banano mundial, lo que le equivale ser el sexto exportador en términos de valor con una participación de 6,1 % y el quinto en términos de volumen con una participación de 7,2 %. En Colombia el banano se produce en 22 departamentos y 204 municipios, hasta el año 200 en el país se encontraban 35.139 unidades productivas agrícolas (UPA). Se exportaron 2.034.00 toneladas de banano, lo que equivale al 91 % de la producción nacional

La zona centro del país a la cual pertenece el Colima produce el 19 % de la producción nacional y el tipo de banano con el cual se desea trabajar es el rechazado del tipo exportación y de consumo interno por estado de cáscara, a este se le desea dar valor añadido deshidratando y volviéndolo a poner en circulación en los mercados.

Asociaciones ASOPROICOTOL: Nace como alternativa laboral para las mujeres de la vereda de Hoya grande del municipio de Icononzo Tolima. El objetivo de esta asociación es integrar a la población

femenina principalmente a la competitividad financiera, mediante el cultivo, distribución y comercialización de banano bocadillo, en conjunto con la comunidad.

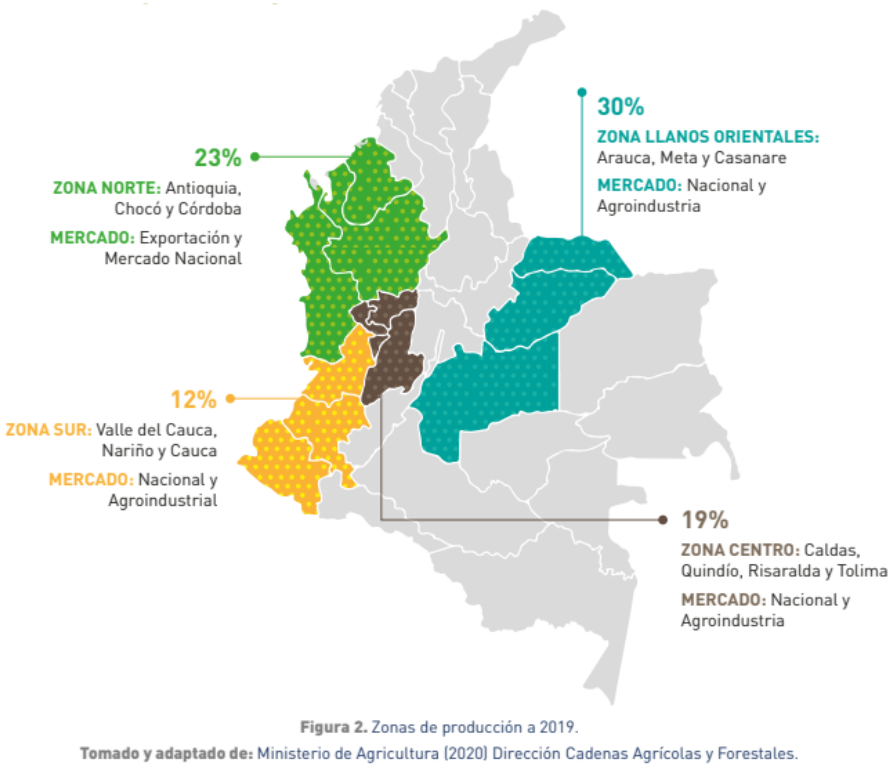



Figura 1: Zonas de producción de banano

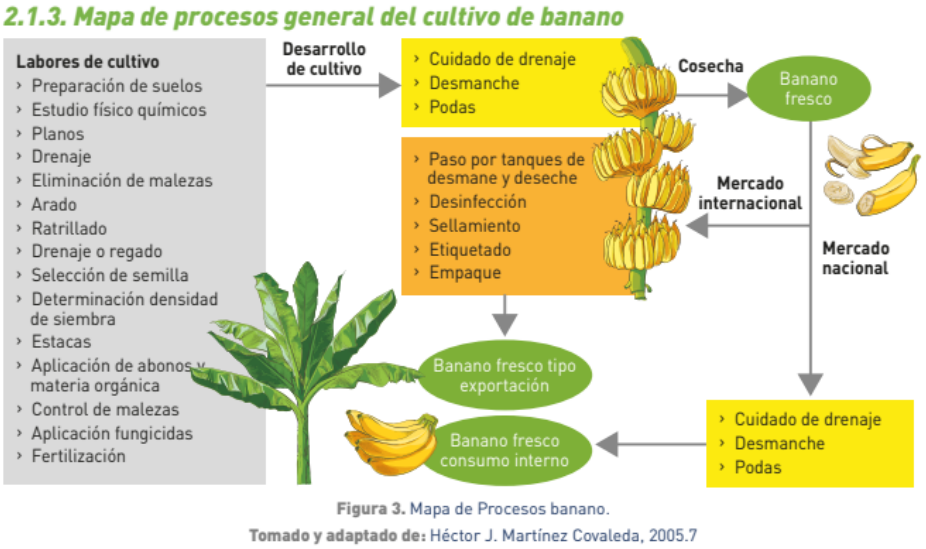



Figura 2: Mapa general del cultivo de banano

### 3.1.2. Económico

EXPORTACIONES: En 2018, Colombia exportó $3,3M en Frutas secas, convirtiéndolo en el exportador número 52 de Frutas secas en el mundo. En el mismo año, Frutas secas fue el producto número 343 más exportado en Colombia. El principal destino de Frutas secas exportaciones de Colombia son:

Alemania ($1,31M), Países Bajos ($602k), Estados Unidos ($278k), Reino Unido ($210k), y México ($195k).

Los mercados de exportación de más rápido crecimiento para Frutas secas de Colombia Entre 2019 y 2020 fueron Estados Unidos ($182k), Bélgica ($69,4k), y México ($49,6k).

IMPORTACIONES: En 2020, Colombia importó $5,21M en Frutas secas, convirtiéndose en el importador número 63 de Frutas secas en el mundo. En el mismo año, Frutas secas fue el producto número 574 más importado en Colombia. Colombia importaciones Frutas secas principalmente de: Chile ($3,27M), Estados Unidos ($824k), Argentina ($809k), Turquía ($109k), y España ($52,3k).

Los mercados de importación de más rápido crecimiento en Frutas secas para Colombia Entre 2019 y 2020 fueron Argentina ($471k), España ($52,3k), y Canadá ($27,5k).

ARANCELES: En 2018, el arancel promedio para Colombia en Frutas secas fué 12,2 %. Los países con los aranceles de importación más altos para Frutas secas fueron Angola (Most Favoured Nation duty rate treatement, 15,0 %), Burundi (Most Favoured Nation duty rate treatement, 15,0 %), Benin (Most Favoured Nation duty rate treatement, 15,0 %), Burkina Faso (Most Favoured Nation duty rate treatement, 15,0 %), y Botswana (Most Favoured Nation duty rate treatement, 15,0 %).

### 3.1.3. Social

Portafolio - El 17 % del total de la fuerza laboral del país trabaja en el campo

La asociación Asoagroproicotol agrupa a varios campesinos del departamento del Tolima, quienes en conjunto disponen de aproximadamente 500 hectáreas para el cultivo de diversos frutos y plantas. Recientemente, ha habido varias iniciativas de agregar valor a los productos, dejando una parte de la producción para venta nacional y otra destinada a la exportación. No obstante, han tenido que enfrentar problemas con intermediarios en el proceso de exportación, lo que disminuye la rentabilidad y el interés en seguir las buenas prácticas agrícolas. En este contexto, la asociación busca alternativas para exportar directamente sus productos, agregando valor al banano bocadillo mediante su deshidratación. La integración y cooperación entre los campesinos, a pesar de poseer lotes pequeños o medianos, puede ser clave para mejorar los procesos y el desarrollo conjunto.

La falta de tecnificación y deficiencias logísticas limitan el potencial del sector agrícola, pero la preocupación e interés por la mejora general de este es muy pertinente para el caso de Colombia, pues además de la disponibilidad de tierras y calidad de los suelos, según el DANE más de 4 millones de personas trabajan en el campo, lo que supone alrededor del 17 % de la fuerza laboral total del país. De esta manera, existe la posibilidad de aprovechar mucho más el mercado internacional, y varios de sus efectos más importantes se verían reflejados directamente en los agricultores.

### 3.1.4. Tecnológico

### 3.1.5. Ambiental

La industria bananera en Colombia actualmente busca convertirse en un sector más competitivo a nivel internacional, disminuyendo el uso de pesticidas prohibidos por entidades extranjeras cómo la unión europea, así como disminuir el uso de elementos plásticos en procesos asociados a distribución. (https://www.portalfruticola.com/noticias/2022/05/13/sector-bananero-colombiano/)

El sector produce anualmente un poco más de 1.5 millones de toneladas de desechos anualmente, dónde los mayores contribuidores a la cifra son los sacos de fertilizantes (1.155 millones de toneladas),

los envases agroquímicos (310,724 toneladas) y el banano de rechazo (250 mil toneladas) en el año 2020. Actualmente, buscan mejor dicha productividad para poder competir más con países como Costa Rica. (https://zonalogistica.com/los-desechos-generados-por-la-industria-bananera-colombiana/)

### 3.1.6. Legal

Normas de manipulación de alimentos en Colombia

- Resolución 2674 de 2013 Notificación, permiso o registro sanitario para alimentos que se comercializan (reglamentación relacionada con el invima)

  Disposición de residuos líquidos y solidos.

  Instalaciones sanitarias (higiene personal, especialmente para operarios)

  Espacio de trabajo (pisos, paredes, iluminación..)

  Artículo 9 equipos y utensilios (materiales resistentes a corrosión y superficies)

  Capacitaciones
- Resolución 810 de 2021
- Etiquetado nutricional y frontal
- Resolución 2505 de 2004
- Transporte de alimentos

**Legislación de alimentos en Colombia**

Otras normas relevantes para la industria alimenticia:

1. Higiene e inocuidad alimentaria (Resolución 2674 de 2013): Aquí podemos consultar la base legal para los Requisitos Sanitarios y BPM llamados prerrequisitos.
2. Análisis de Peligros y Puntos de Control Crítico (HACCP) (Resolución 60 de 2002): En esta norma se definen los criterios de inocuidad e higiene alimentaria.
3. Clasificación de los alimentos (Resolución 719 de 2015): De acuerdo con el impacto en la salud pública que los alimentos puedan tener, se hace una clasificación.
4. Material de Empaque para alimentos y bebidas (Resolución 683 de 2012): Antes de adquirir envases, envoltorios y equipos en contacto directo con el alimento, debemos consultar esta norma.
5. Etiquetado o rotulado como Información al consumidor (Resolución 5109 de 2005): Determina los requisitos de etiquetado o rotulado que deben cumplir los alimentos envasados o materias primas para consumo humano.
6. Control de peso neto (NTC 2167 de 2016): Establece que los productos pre-envasados cumplan con el contenido neto y que el producto ha sido sometido a un tratamiento estadístico y, por lo tanto, el peso indicado se acerca mucho al real.
7. Aditivos alimentarios (Resolución 2606 de 2009): Podemos consultar los requisitos de los aditivos para consumo humano.

8. Declaraciones nutricionales (Resolución 333 de 2011): La comunicación publicitaria plasmada en los envases debe estar definida con base científica.
9. Transporte de alimentos (Resolución 2505 de 2004): Se reglamentan las condiciones que deben cumplir los vehículos para transportar carne, pescado u otros alimentos.
10. Agua Potable (Resolución 2115 de 2007): Para todos los procesos en que se haga uso de agua, la empresa en cuestión debe aplicar esta norma como sistema de control.

# 4. Formulación del proyecto

## 4.1. Requerimientos

Dentro de los requerimientos y expectativas del cliente hacia el prototipo se tienen las siguientes

- Obtención de prototipo semiautomático de cortadora longitudinal de bananos tipo bocadillo, el diseño conceptual del prototipo debe permitir escalar el concepto a un uso industrial y contemplar posibles cortes de otras frutas.
- Se espera que las mitades cortadas del banano sean lo más uniformes posibles, una de las dos mitades no podrá superar el 55 % del espesor del banano original. Esto deberá cumplirse en al menos el 85 % de los bananos cortados.
- El diseño físico de la cortadora de bananos podrá ser una máquina independiente a la deshidratadora pero debe estar pensada para integrarse armónicamente a la línea de producción.
- El tiempo de corte para cargar a máxima capacidad la máquina deshidratadora (60 kg) se espera por debajo de los 90 minutos.

Estos requerimientos se tomarán en cuenta para todo el proceso de diseño y se validarán en la sección 13.

## 4.2. Objetivos

### 4.2.1. Objetivo general

Dotar la línea de producción de deshidratado de frutas, con un prototipo semi-automático del subsistema encargado del cortado de banano bocadillo.

### 4.2.2. Objetivos específicos

- Realizar métricas de interés relacionadas con el proceso de corte de banano bocadillo.
- Identificar los requerimientos y especificaciones del subsistema de corte de banano bocadillo como la capacidad de producción, los requisitos de seguridad y calidad alimentaria.
- Diseñar sistema de alimentación manual, semiautomatico o automatico , que sujete y acomode la fruta para su posterior corte en mitades longitudinales.
- Seleccionar los métodos y herramientas de corte que se utilizarán en el subsistema de corte de frutas, como cuchillas, sierras o hilos.
- Validar el cumplimiento de los requerimientos y especificaciones definidas previamente, aplicando métricas de desempeño del subsistema.

## 4.3. Selección de alternativas

Se tomo como metodología de toma de decisiones las matrices de Pugh, la cual es una herramienta de tipo cuantitativo que utiliza un entorno multidimensional para escoger la mejor de una serie de opciones.

### 4.3.1. Propuestas y evaluación de alternativas

En un primer filtro se consideraron las siguientes alternativas para el sistema de corte y para el sistema de sujeción y alimentación, con sus respectivos criterios de evaluación.

| Sistema de corte | Precisión del corte | Velocidad del corte | Capacidad de cobertura a otras | Sistema de control | Tiempo de diseño | Viabilidad de recursos | Tiempo de manufactura | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ponderacion--> | 18% | 10% | 10% | 12% | 12% | 20% | 18% | 100% |
| Cuchilla lineal | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,38 |
| Cuchilla estatica | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | -1 | 0 | 0,14 |
| Cuchilla giratoria | 1 | 1 | 1 | 0 | -1 | -1 | -1 | -0,12 |
| Cuchilla reciprocante | 1 | 0 | 1 | 0 | -1 | -1 | -1 | -0,22 |
| Cuchilla pivotada | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,1 |
| Corte Hilo | 0 | 0 | 1 | 0 | -1 | -1 | -1 | -0,4 |

Figura 3: Matriz de selección sistema de corte

| # Criterio -> | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Evaluacion Sis. Corte | Precisión del corte | Velocidad del corte | Capacidad de cobertura a otras frutas | Sistema de control requerido | Tiempo de diseño requerido | Viabilidad de recursos economicos y de manufactura | Tiempo de manufactura | Total |
| Ponderacion -> | 18% | 10% | 10% | 12% | 12% | 20% | 18% | 100% |
| -1 | Alta posibilidad de flexion del banano al momento del corte, resultado burdo. | Bajas velocidades que afectan la posibilidad de lograr la produccion deseada 60kg/90min. | Método de corte no aplicable a bananos con dimensiones atípicas a la media. | Sistema de control de alta precision con componentes fuera del presupuesto. | Tiempo de diseño necesario supera lo estimado en el cronograma. | No se tienen los recursos economicos, disponibilidad de materiales ni capacidades de manufactura. | Tiempo de manufactura necesario supera lo estimado en el cronograma. | |
| 0 | Baja posibilidad de flexion del banano al momento del corte, resultado Aceptable. | Velocidad media que mantiene con dificultad la posibilidad de lograr la produccion deseada 60kg/90min. | Método de corte aplicable al 98% de las geometrias de los bananos y a al menos una fruta más. | Sistema de control dentro del presupuesto y complejidad media. | Tiempo de diseño necesario es igual a lo estimado en el cronograma. | Se tienen los recursos economicos al limite, disponibilidad de materiales y capacidades de manufactura. | Tiempo de manufactura necesario es igual a lo estimado en el cronograma. | |
| 1 | Corte limpio sin afectar la integridad del banano ni de la cuchilla, resultado Excelente. | Veloidad alta que supera con gran facilidad las tasas de produccion requeridas 60kg/90min. | Método de corte aplicable a 3 o más tipos de fruta incluyendo al banano. | Sistema de control dentro del presupuesto y complejidad baja. | Tiempo de diseño necesario es menor a lo estimado en el cronograma. | Se tienen los recursos economicos, disponibilidad de materiales y capacidades de manufactura. | Tiempo de manufactura necesario es menor a lo estimado en el cronograma. | |

Figura 4: Criterios de evaluación para la matriz de selección sistema de corte

| Sistema de Sujeción y alimentación | Error en la alineación | Manipulacion de la fruta | Capacidad de cobertura a otras frutas | Sistema de control requerido | Tiempo de diseño requerido | Viabilidad de recursos economicos y de manufactura | Tiempo de manufactura | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ponderacion--> | 28% | 10% | 5% | 12% | 10% | 20% | 15% | 100% |
| Placas en V | -1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,39 |
| Gripper | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,33 |
| Placas paralelas con resorte | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0,52 |
| Resorte angular tipo griper | 1 | 0 | 1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0,23 |
| Moldes curvos | 0 | 0 | 0 | 1 | -1 | 0 | 0 | 0,02 |
| Placas paralelas fijas | 0 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,42 |
| Rodillos | 1 | 0 | 1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0,23 |

Figura 5: Matriz de selección sistema de transporte y sujeción

| Evaluacion Sis. Sujeción | Error en la alineación | Manipulacion de la fruta | Capacidad de cobertura a otras frutas | Sistema de control requerido | Tiempo de diseño requerido | Viabilidad de recursos economicos y de manufactura | Tiempo de manufactura | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ponderacion -> | 28% | 10% | 5% | 12% | 10% | 20% | 15% | 100% |
| -1 | Grandes errores alineando el banano | Complicada | Método de corte no aplicable a bananos con dimensiones atípicas a la media. | Sistema de control de alta precision con componentes fuera del presupuesto. | Tiempo de diseño necesario supera lo estimado en el cronograma. | No se tienen los recursos economicos, disponibilidad de materiales ni capacidades de manufactura. | Tiempo de manufactura necesario supera lo estimado en el cronograma. | |
| 0 | Errores aceptables en la alineacion, cumplen con el 55% espesor corte. | Requiere trabajo | Método de corte aplicable al 98% de las geometrias de los bananos y a al menos una fruta más. | Sistema de control dentro del presupuesto y complejidad media. | Tiempo de diseño necesario es igual a lo estimado en el cronograma. | Se tienen los recursos economicos al limite, disponibilidad de materiales y capacidades de manufactura. | Tiempo de manufactura necesario es igual a lo estimado en el cronograma. | |
| 1 | Errores minimos en la alineacion | Sencilla | Método de corte aplicable a 3 o más tipos de fruta incluyendo al banano. | Sistema de control dentro del presupuesto y complejidad baja. | Tiempo de diseño necesario es menor a lo estimado en el cronograma. | Se tienen los recursos economicos, disponibilidad de materiales y capacidades de manufactura. | Tiempo de manufactura necesario es menor a lo estimado en el cronograma. | |

Figura 6: Criterios de evaluación para la matriz de selección sistema de transporte y sujeción

### 4.3.2. Experimentación

Con el fin de tener una caracterización especifica del banano bocadillo, se realizaron unas mediciones con una muestra de 32 bananos de uno de los lotes que arribaron al laboratorio para ser deshidratados (Anexo Datos/Mediciones Bananos.xlsx).

Inicialmente se realizaron las mediciones generales de los bananos para establecer una geometría promedio

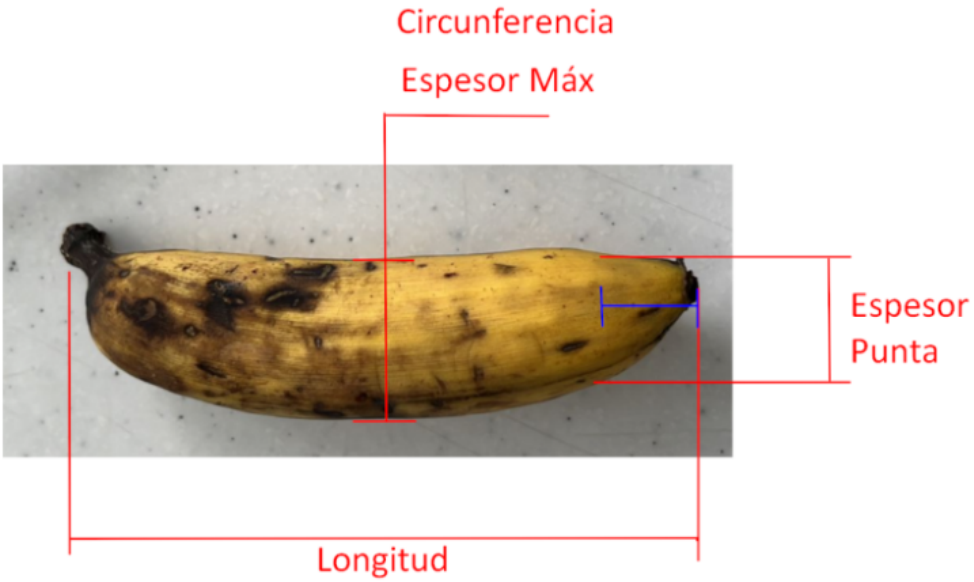



Figura 7: Toma de mediciones del banano bocadillo

Las medidas de distribución se presentan a continuación

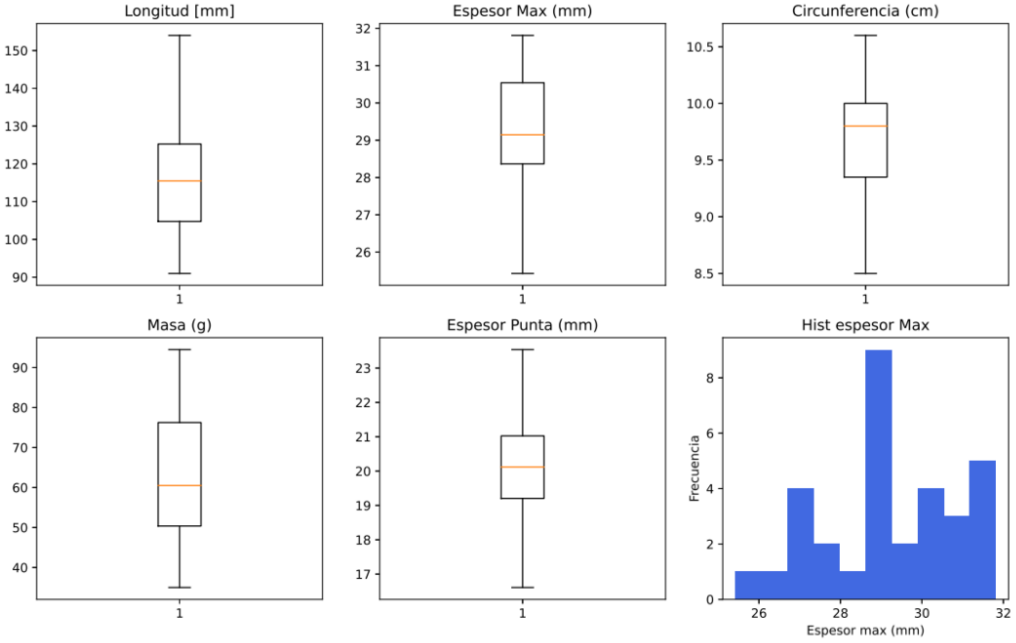



Figura 8: Mediciones del banano bocadillo

Haciendo uso del texturometro disponible en el laboratorio, se realizaron algunas pruebas con tal de poder obtener la carga máxima y la deformación total de bananos en es estado óptimo de maduración, y para ello fue necesario imprimir un soporte mediante FDM para acoplar las cuchillas de prueba de acero templado 316.

(a) Soporte impreso para las pruebas de carga máxima

(b) Pruebas de carga máxima

Figura 9: Pruebas de corte

A continuación se presentan los resultados de estas pruebas

Cuadro 1: Resultados de pruebas carga máxima

| Prueba | Grado de maduración | Carga final [Gf] | Desplazamiento [mm] |
|---|---|---|---|
| **1 Filo** | 6 | 3523 | 20 |
| **1 punta** | 3 | 409.5 | 11.1 |
| **2 Punta** | 3 | 2567 | 20 |
| **3 Punta** | 4 | 3329 | 20 |

Los grados de maduración se muestran a continuación

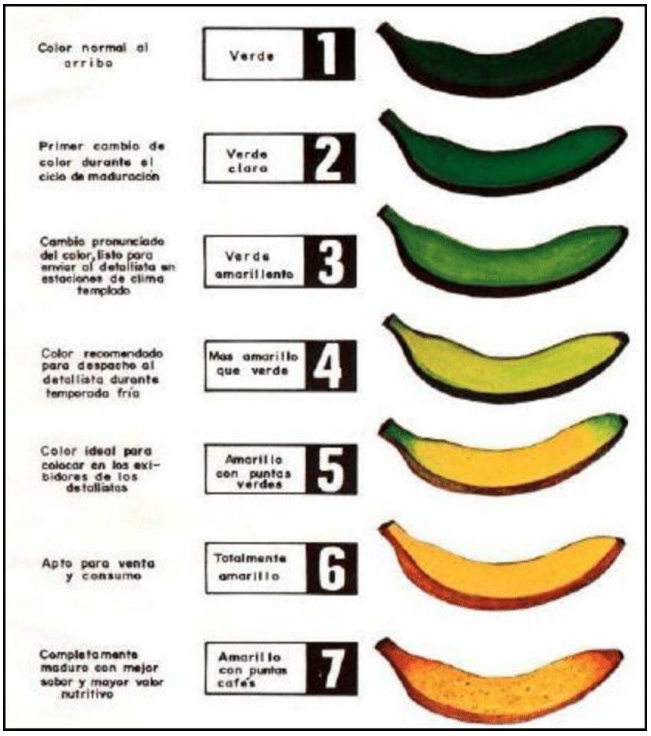



Figura 10: Grados de maduración

Después de tener un mayor conocimiento sobre algunos de los mecanismos propuestos y tras la elaboración de algunas pruebas se realiza un segundo filtro:

| Alternativa | Precisión del corte | Tasa de Produccion (incluida alimentacion) | Adaptacion a diferentes tamaños banano | Sistema de control requerido | Tiempo de diseño requerido | Tiempo de manufactura | Alineacion de la fruta | Manipulacion del operario (seguridad) | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ponderacion--> | 13% | 10% | 10% | 16% | 16% | 16% | 13% | 6% | 100% |
| 1 | 0 | -1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | -1 | 0,32 |
| 2 | -1 | -1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | -1 | 0,19 |
| 3 | 0 | -1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | -1 | 0,32 |
| (Datum) 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | -1 | 1 | -1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0,13 |
| 6 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0,16 |
| 7 | 0 | -1 | 1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | -0,03 |
| 8 | 0 | -1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0,38 |
| 9 | 0 | -1 | 1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | -0,03 |
| 10 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -0,13 |

Figura 11: Segundo filtro matriz de selección sistema de corte

La siguiente tabla muestra las alternativas finales que fueron consideradas, así como las especificaciones de sus respectivos subsistemas:

| Alternativa | Sis. Corte | Sis. Sujecion | Sis. Control |
|---|---|---|---|
| 1 | Cuchilla lineal inclinada | Placas V Estaticas | Actuador lineal cuchilla |
| 2 | Cuchilla lineal Plana | Placas V Estaticas | Actuador lineal cuchilla |
| 3 | Cuchilla lineal V | Placas V Estaticas | Actuador lineal cuchilla |
| 4 | Cuchilla Giratoria | Bandas en V | Giro de la cuchilla y movimiento de las bandas |
| 5 | Cuchilla lineal inclinada | Griper/Punzones | Actuador lineal cuchilla y fuerza del griper |
| 6 | Cuchilla lineal Plana | Griper/Punzones | Actuador lineal cuchilla y fuerza del griper |
| 7 | Cuchilla lineal V | Griper/Punzones | Actuador lineal cuchilla y fuerza del griper |
| 8 | Cuchilla Giratoria | Placas V Estaticas empujador manual | Giro de la cuchilla |
| 9 | Cuchilla Giratoria | Griper/Punzones | Giro de la cuchilla, movimiento de corte de la cuchilla y fuerza del griper |
| 10 | Cuchilla Estatica inclinada | Bandas en V | Movimiento de las bandas |

Figura 12: Matriz de selección sistema de transporte y sujeción

## 4.4. Aspectos claves del proyecto

### 4.4.1. Alcance

El proyecto se encuentra enfocado en la búsqueda de una alternativa de corte que permita dividir el banano en dos partes para la facilidad de pelado en el proceso de producción de fruta deshidratada; es por este motivo que el alcance del proyecto engloba desde el análisis de distintas alternativas de los sistemas presentes, la selecció de la mejor alternativa, el diseño de los sistemas iniciales, fabricación y manufactura de estos y concluirá con la verificación y validación del sistema de corte y de control.

Como aspectos claves para el desarrollo del proyecto se tiene el estudio de los sistemas mecánicos que permitan el corte adecuado del banano y la aplicación de conceptos básicos de ingeniería. Una vez definido el proceso, se procede con el desarrollo de un modelo físico que permita evaluar la calidad y efectividad del método empleado y del prototipo final.

### 4.4.2. Cronograma

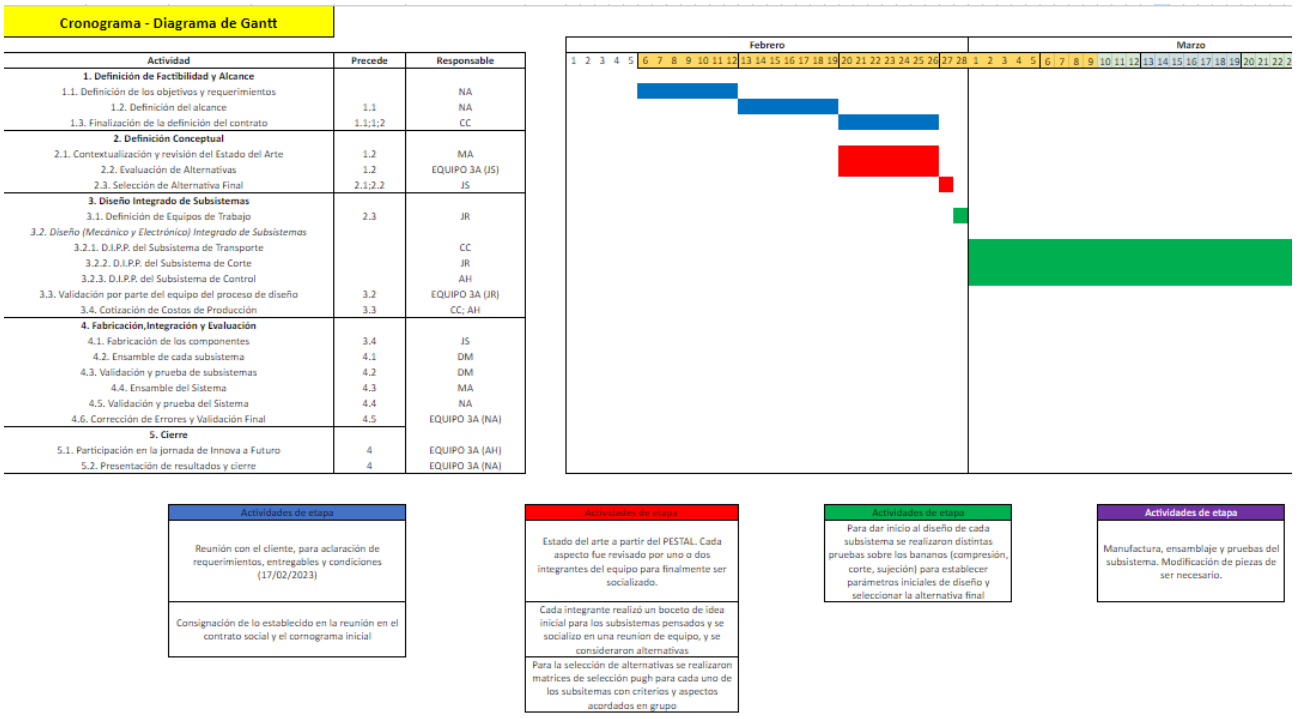



Figura 13: Cronograma

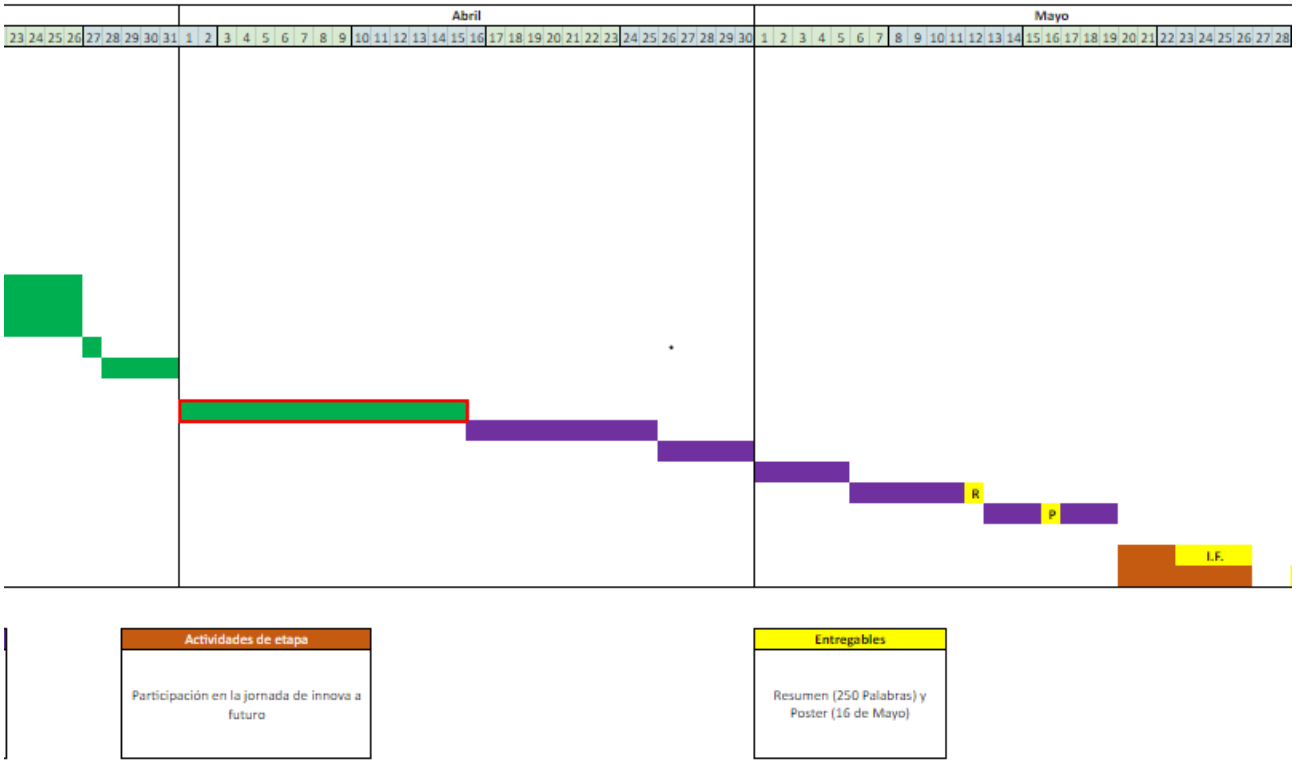



Figura 14: Cronograma

## 4.5. Metodología de diseño

El cronograma contempla el desarrollo en paralelo de los tres subsistemas del prototipo: alimentación, corte y control. Cada subsistema se compone de tres fases, 1. Diseño conceptual, en el cual se abordo de manera autónoma en cada caso, 2. Diseño integrado de producto y proceso (DIPP) y 3. Fabricación y validación, así como de una pre fase que concierne la identificación de requerimientos y objetivos, y una fase de cierre de proyecto.

El Diseño Integrado de Producto y Proceso o DIPP es una metodología de desarrollo que busca conseguir alta eficiencia y sostenibilidad en el proceso de manufactura en simultáneo con alta funcionalidad y calidad del producto, bajo un ambiente y recursos específicos. Involucra la definición de una metodología de diseño de producto (orientada en el material a utilizar y la geometría deseada) y una metodología de producción (orientada a múltiples criterios como sostenibilidad, uso de material, pérdidas) y luego emplear un mecanismo integrador que busca generar un diseño sostenible, óptimo y eficiente.

Se es coge esta metodología ya que no solo integra el diseño de producto y proceso, si no el trabajo entre sistemas para lograr un producto sostenible, óptimo y eficiente, para esto se tienen en cuenta requerimientos y objetivos del cliente y se adecuan a la visión de sostenibilidad, calidad y eficiencia.

# 5. Diseño del sistema de Corte

## 5.1. Parámetros iniciales sistema de corte

Para iniciar con el diseño del sistema de corte se debes tener en cuenta los parámetros de diseño que nos solicita el cliente y que afectan directamente parámetros de diseño que se requieren en el sistema de corte. Principalmente todo depende de la tasa de corte solicitada que son 60 kg de banano en 90 minutos.

Al traducir esto, nos da una tasa de corte de 0.6667 kg/min, pero esto no nos indica datos claros y funcionales. A partir de las pruebas experimentales realizadas e indicadas anteriormente se tiene que en promedio un banano pesa 45g, con esta información es fácil cambiar la tasa de corte a una unidad mas visible, lo que serian 14.8 Und/min, lo que nos indica ya el numero de bananos que se deben cortar en un minuto para mantener una tasa de corte que cumpla los requerimientos.

A partir de la tasa anterior que se puede analizar como la frecuencia de corte, se halla el periodo que indica cuanto tiempo hay para cortar un solo banano, en este caso solo consta en dividir 60 segundos que corresponden a un minuto por la frecuencia de corte obtenida, lo que da un tiempo de 4.05 segundos para cortar cada banano.

Este tiempo encontrado se debe tener en cuenta que incluye el proceso de alistamiento, en el cual se ubica el banano en el cajón, y posteriormente si entra el tiempo de corte, en el cual se empuja el cajón hacia la cuchilla y el banano sale al final del movimiento, después se vuelve al punto inicial. Según pruebas realizadas se dedujo que el tiempo de alistamiento debería corresponder a una menor parte respecto al de corte, dando una proporción de 30 % de tiempo para alistamiento y un 70 % para corte da como resultado 1.2 segundos para poner el banano en el cajón y 2.8 segundos para hacer el movimiento completo de corte.

## 5.2. Cuchilla de corte

Para el diseño de la cuchilla, según la etapa de selección de alternativas resulto en que se iba a usar una cuchilla de corte circular que va a rotar, esta no va a ser dentada ni nada por el estilo debido al material que se esta cortando no lo requiere, únicamente tendrá un filo simétrico por ambos lados del disco.
Se parte inicialmente de la selección del material, y para esto se deben tener dos factores muy importantes, el primero es el ámbito legal, el cual nos indica que al ser una pieza que va a estar en contacto directo con alimentos, pues esta debe ser de un material inoxidable completamente; el otro factor a analizar fue la disponibilidad comercial, por lo que se contactó con diferentes productores de cuchillas y se definió finalmente que el material mas utilizado para la manufactura de estas cuchillas es el acero inoxidable 420.

Posteriormente para el diseño de la cuchilla se debe definir tres dimensiones claves, las cuales son: el diámetro, el espesor y el ángulo de filo. Para definir el diámetro se realizo una investigación sobre que parámetros afectan el tamaño de esta cuchilla y según el libro de Fundamentos de Tecnología de los Alimentos [1] el diámetro de la cuchilla depende netamente del objeto que se va a cortar, como en este caso son bananos, se tomo a partir de las dimensiones registradas la altura máxima que un banano podría penetrar en la cuchilla y esta fueron 40mm por lo tanto el libro recomienda una relación para encontrar el radio de la cuchilla, la cual es $r = 2{,}5 * Ec$, siendo así, el diámetro calculado a partir del espesor de corte del banano es de 200 mm.

Un factor crucial para el corte es el filo de la cuchilla, según este filo las cargas de corte se distribuyen de una manera diferente y se transmiten a la cuchilla, por esto mismo aunque la información no es clara en cuanto a cuchillas circulares, en general para alimentos blandos como frutas y verduras el libro [1] recomienda un ángulo de filo entre 15-20°, esto hablando del filo sencillo que se mide respecto a la vertical, es decir, hablando de una cuchilla de filo simétrico, el ángulo completo del filo sería el doble, tal como se muestra en la figura 31. Para este caso se seleccionó $\alpha = 15$ que es un ángulo de gran uso en estas aplicaciones.

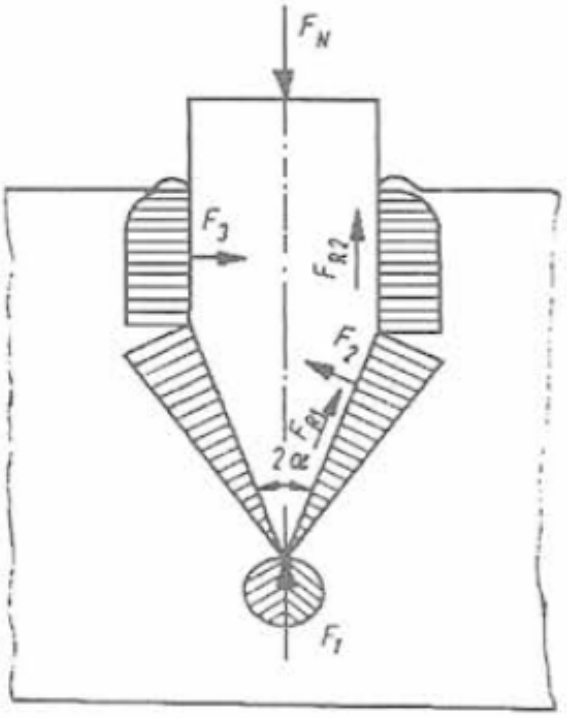



Figura 15: Perfil de la cuchilla y fuerzas actuantes [1]

Finalmente solo resta definir el espesor de la cuchilla y para esto se usaron dos métodos, el analisis por esfuerzo normal, correspondiente a la fuerza normal que se observa en la figura 31 y además un analisis por pandeo el cual es el limitante para el diseño de esta cuchilla.

La fuerza normal necesaria para cortar el banano se encontró para una cuchilla estática mediante pruebas de laboratorio, la cual dio 33 N de fuerza. Utilizar esta fuerza para el diseño de la cuchilla circular no es exacto pero es mejor para sobredimensionar levemente el diseño, pues una cuchilla al girar distribuye mucho más los esfuerzos por lo que las cargas disminuyen pero se trabaja con esta sobredimensión para lograr justificar la escalabilidad del sistema para que a futuro pueda incluso cortar frutas o verduras mucho mas duras.

Para encontrar el espesor por esfuerzos normales se utilizó la teoría de esfuerzos admisibles, utilizando un factor de seguridad de 2 y el esfuerzo a fluencia del inox 420 se obtuvo un esfuerzo admisible de 547 MPa, a partir del cual al usar la carga de 33N nos da un área mínima de aplicación de 0.06 $mm^2$ y esto traducido al área de aplicación de la fuerza corresponde a un espesor mínimo de 9.6E-5 mm. Como se puede observar realmente la restricción no es para nada critica gracias a las propiedades del acero inoxidable.

Continuando se procedió con el diseño por pandeo, ya que usualmente estas cuchillas se pueden

considerar elementos esbeltos debido a su pequeña relación entre espesor y diámetro. Para usar la teoría de pandeo se requiere una longitud efectiva la cual corresponde al radio del disco, se debe incluir además la carga que se esta aplicando multiplicada por el factor de seguridad de 2 y seguido a partir de estos dos datos se encuentra la mínima inercia que requiere una sección diferencial del disco contemplada como la columna que esta en contacto con el banano desde ese punto de corte hasta el eje de giro y esta resulto en un mínimo de 3.3E-13 $m^4$, a partir de esta simplemente se encontró el espesor que le corresponde y da un mínimo de 0.58 mm. Es claro que el pandeo restringe mucho más que el esfuerzo normal, pero igualmente da un espesor sumamente delgado, por esto ya hablando comercialmente con los productores de cuchillas se encontró que el espesor que trabajan usualmente son 1.6mm y este sería el seleccionado para realizar la cuchilla, asegurando así un corte fino y una resistencia segura para escalar el proceso.

Por ultimo se requería definir las velocidades óptimas de operación de la cuchilla, para lo cual a partir de los parámetros iniciales calculados en corte y teniendo en cuenta que el recorrido del cajón serian 50 cm (se explica en transporte) además que el tiempo en maquina serian 2.8 s, se calculo la velocidad de avance promedio que debería tener el movimiento para cumplir con la tasa de corte requerida, a partir de esta y del handbook Food Process equipment [2], se encontró una relación mínima entre la velocidad de avance y la velocidad tanjencial del disco debe ser 1:30 por lo que la velocidad tangencial daría un valor de 10.5m/s, lo que traducido a revoluciones corresponde a 1010.5 RPM, además teniendo en cuenta que se usará una reducción 2:1 del motor al eje de la cuchilla (Revisar diseño transmisión), esto nos da como velocidad mínima requerida para el motor de 2021 RPM.

## 5.3. Tuercas de sujeción

Las tuercas de sujeción corresponden al mecanismo que se usa para transmitir el torque del eje a la cuchilla, como la cuchilla es un elemento tan delgado, no se puede usar chaveta, ni prisionero para esa transmisión de torque, las opciones eran pocas, una opción seria ubicar bridas con chaveteros pero eran demasiado robustas para una cuchilla de ese calibre, así que se decidió investigar sobre la sujeción de discos de corte de maquinaria que no fuese para alimentos pues sobre estas no se encontraba nada.

Finalmente se decidió optar por el sistema de sujeción que utilizan las pulidoras convencionales de discos de tamaño 4 1/2”, en especial las tuercas de la marca Dewalt, pues estas son las que mejor se acomodan a nuestra aplicación. Su funcionamiento básico son tuercas que transmiten el torque mediante fricción, la tuerca interna gira concordante al eje mediante un cuadrante que se sujeta a este, en esta tuerca interna está una sección de 5/8”de diámetro la cual es el asiento para el disco, y la tuerca externa presiona el disco mediante un roscado que hay en el eje, entre las tuercas se presenta la presión necesaria para que netamente por fricción el disco gire de la misma manera que el eje lo hace. Las tuercas se muestran a continuación.

Figura 16: Perfil de la cuchilla y fuerzas actuantes [1]

Se tienen diferentes beneficios respecto al uso de este sistema, principalmente su simplicidad es lo que más destaca pues la cuchilla no requiere sino un solo agujero sin ninguna geometría compleja de maquinar, y el eje solo requiere un roscado y un cuadrante que es fácil de maquinar; además es un elemento que se puede cambiar muy fácilmente, pues su adquisición es sencilla en cualquier ferretería y aunque no es inoxidable del todo, si tiene un recubrimiento que lo pro teje de la intemperie el cual es suficiente ya que en ningún momento va a estar expuesto directamente al contacto del alimento. Como contras se debe tener muy en cuenta que es un sistema que depende de una rosca, y ese mecanizado es mas complejo para el eje además de generar concentradores de esfuerzos, además se debe calcular bien el sentido de giro que sea contrario al de la rosca, ya que si son iguales esta podría generar que la tuerca se suelte.

## 5.4. Transmisión

Para el diseño / selección de la transmisión nos inspiramos de primera mano en aplicaciones similares de uso de transmisiones flexibles en máquinas rotativas con motores de la mismas características. La mayoría de aplicaciones empleaban correas y poleas dentadas y mostraban un buen rendimiento, con bajas vibraciones y casi sin errores. Adicionalmente revisando en las referencias de diseño [3], se corroboran las ventajas de emplear correas y poleas síncronas. Entre dichas ventajas se encuentra el hecho de que al ser tanto la polea como la correa dentadas, la transmisión es constante y elimina la necesidad de una velocidad límite mínima o máxima de operación: la transmisión es constante para cualquier velocidad angular y relación de transmisión.

Para realizar el diseño, se tomó como referencia el algoritmo indicado por el manual de diseño de Childs [4], el cual gira en torno a la selección y diseño del espesor óptimo de la correa. Empleamos una verificación por dos métodos del espesor de la correa, que es el factor más crítico para garantizar la vida útil del sistema: Trabajamos con ecuaciones empíricas del Horsepower Rating extraídas de manuales de diseño [5] y con las tablas de selección y curvas del distribuidor que optamos por utilizar. Para llegar a dicha selección se definió de forma previa una relación de transmisión deseada de 2, tomando un punto operativo bajo del motor y buscando una amplificación del torque no muy alta, para poder conservar las rpms necesarias para el corte. Con la potencia requerida se definió una potencia de diseño y ,usando las rpms del eje rápido, se seleccionó por tabla una correa del tipo XL. Ya con este dato, empleando la distancia entre centros y los díametros de las poleas correspondientes y recomendadas por el fabricante para la transmisión, se seleccionó el ancho óptimo de la correa en 0.37 pulgadas, por lo que la correa adquiere la designación 150XL037.

Respecto al diseño y resistencia de las poleas, los algoritmos no solicitan dichas verificaciones. Sin embargo, consultando referencias de diseño mecánico se concluyó que debíamos obtener un ángulo de envoltura (wrap angle) de más de 120 grados en la polea de menor tamaño. Dicho ángulo puede apreciarse en la siguiente figura:

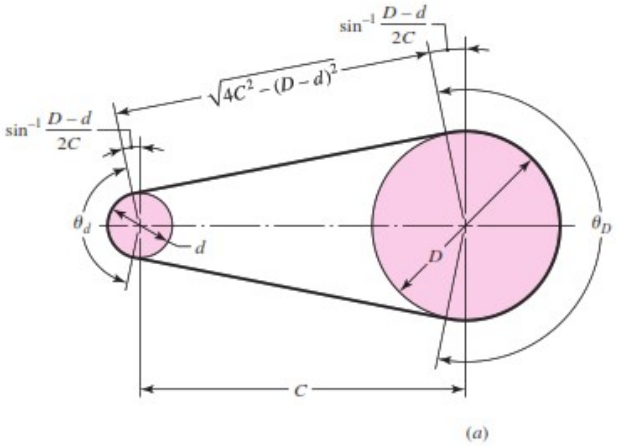



Figura 17: Diagrama Geométrico de las Cuchillas [3]

Al aumentar ese ángulo se logra que la polea no se salte y que no se sobreesfuercen los dientes en contacto. Los cálculos muestran que la polea pequeña posee un ángulo de 163 grados. Este ángulo se toma como métrica de seguridad de diseño para la transmisión. A continuación se indican los resultados finales de la transmisión:

Cuadro 2: Resultados de pruebas carga máxima

| Elemento | Designación |
|---|---|
| **Polea Menor** | 20XL037 |
| **Polea Mayor** | 40XL037 |
| **Correa** | 150XL037 |

## 5.5. Eje

El diseño del eje involucró un proceso de cálculo desde el enfoque estático (esfuerzos y deflexiones) hasta el enfoque dinámico (fatiga y velocidad crítica). Para empezar el diseño del eje, previo a considerar los elementos dispuestos sobre el eje además de la cuchilla diseñada anteriormente, se realizaron los cálculos aproximados de las fuerzas de corte a partir de la definición geométrica aproximada de los ángulos de entrada y salida del corte. Así mismo, se contemplan las cargas que siente el eje por la misma transmisión. Considerando ahora que la cuchilla se monta en voladizo, al igual que la polea, se da la siguiente disposición sobre el eje considerando dos apoyos:

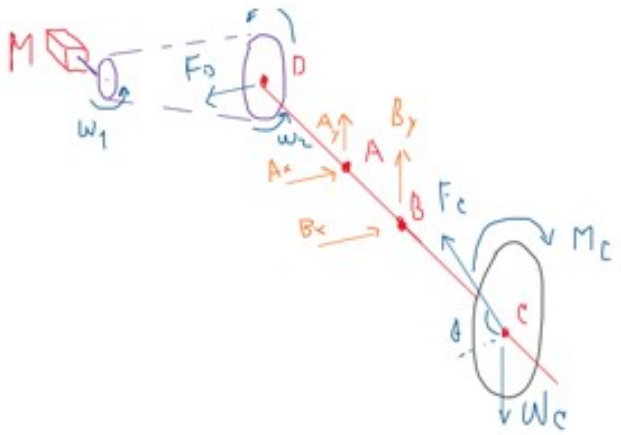



Figura 18: Diagrama de Cuerpo Libre del Eje

Se emplea la herramienta Excel para parametrizar la solución estática de los apoyos, donde cada apoyo será una chumacera que permite la rotación sobre el eje z y posee dos reacciones principales. Las fuerzas y momentos aplicados con subíndice ç.en el diagrama corresponden los valores asociados al corte. La posición ”dçorresponde a la polea. A continuación se incluyen las distancias y valores calculados de las reacciones:

| Geometría del Eje | |
|---|---|
| DA (m) | 0,03785 |
| DB (m) | 0,10145 |
| DC (m) | 0,21205 |

Figura 19: Distancias entre apoyos y puntos de interés

| Cargas y Reacciones | |
|---|---|
| Fdx (N) | -42,77605128 |
| Md_xy (Nm) | 1,300386286 |
| Fcx (N) | 7,755032874 |
| Fcy (N) | 8,229440983 |
| Mc_xy (Nm) | 1,130770683 |
| Wc (N) | 6,815471268 |
| **Ax (N)** | **-81,719** |
| **Ay (N)** | **2,459** |
| **Bx (N)** | **46,698** |
| **By (N)** | **-3,873** |

Figura 20: Cargas y Reacciones

Tras calcular reacciones en el eje, se construyen los diagramas de momento flector, fuerza cortante y torsor, para dar una visualización del sometimiento de cargas del eje para orientar el diseño de mejor manera. Dichos diagramas se presentan a continuación:

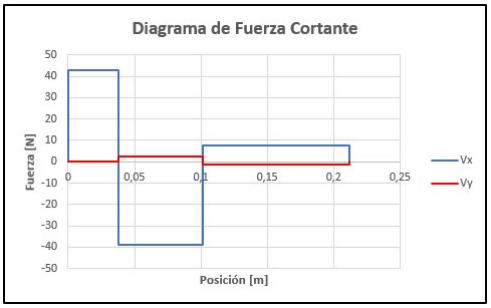



Figura 21: Diagrama de Fuerza Cortante

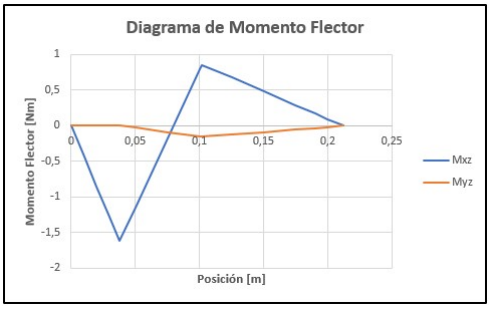



Figura 22: Diagrama de Momento Flector

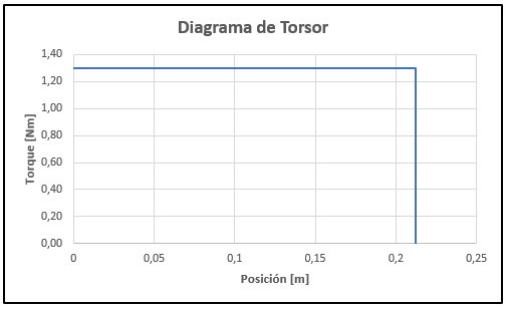



Figura 23: Diagrama de Torsor

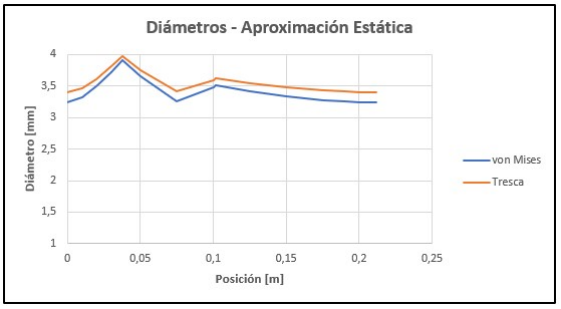



Figura 24: Diámetro mínimo generado por cálculos estáticos

A partir de los valores de momento flector y definiendo las zonas críticas de carga (concentración de esfuerzos por cambios de sección y sobreposición de cargas), se pasa al diseño final geométrico por fatiga considerando lo siguiente:

- Se definió como esfuerzo alternante el esfuerzo asociado a momentos flectores. El esfuerzo por torsión se consideró medio.
- Para la concentración de esfuerzos se consideraron solamente cambios de sección. No hay ranuras o cortes hacia el interior del eje que influyan en la vida a fatiga. Su modelamiento se hace empleando las ecuaciones de libros especializados [6].
- Para el uso de materiales se contempló la norma de regulación de materiales de la industria alimenticia. Se optó por aleaciones de aluminio y la mayoría de cálculos se hicieron con el 3003-O [7]. Sin embargo, por su limitado acceso comercial, se optó por fabricación en 7075-T6. Los cálculos realizados con 3003-O, al ser un material más blando, son representativos.
- Datos asociados a sensibilidad de muesca, coeficientes de Marin y factores de seguridad se obtuvieron de libros de diseño especializados [3].
- Cálculos de deflexiones y velocidad crítica fueron realizados empleando un handbook especializado [8]. Los cálculos de deflexión se hacen con la ecuación de curva elástica universal. Empleando estos cálculos se define la velocidad crítica.

Considerando lo anterior, para la sección más crítica (carga más alta en un cambio de sección) para el 3003-O, se obtienen los siguientes factores de seguridad de Goodman, ASME Elíptico y de Fluencia:

| FS Goodman Mod | FS ASME Elliptic | FS Yield |
|---|---|---|
| 29,063 | 31,038 | 23,355 |

Figura 25: Factores de Seguridad

Confirmando diferentes secciones, cuyos diámetros dependieron de las relaciones de hombros, se obtiene la siguiente disposición del eje:

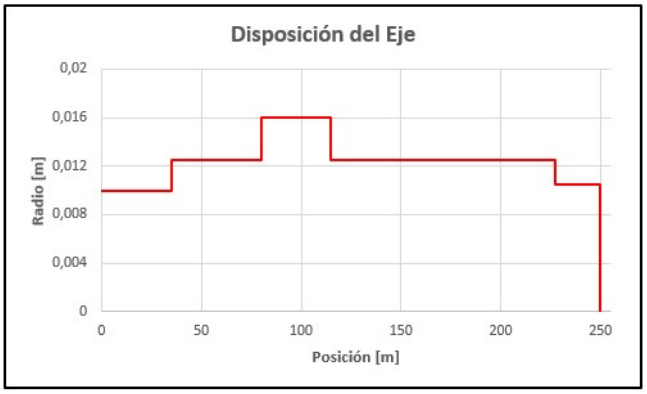



Figura 26: Disposición final del eje

Finalmente se verifican deflexiones y la velocidad crítica del eje. Para las deflexiones se emplea la ecuación de curva elástica universal, determinando las constantes de integración a partir del sistema. Con las constantes de integración, se dibuja la curva de deflexiones y pendientes, para verificar que no sobrepasen los máximos. Por referencia, la deflexión en las chumaceras no debe ser mayor a 0 y no deben tener pendientes mayores a 0.0026 radianes [3]. Esto se empleó para determinar las constantes de integración. Se obtienen las siguientes gráficas:

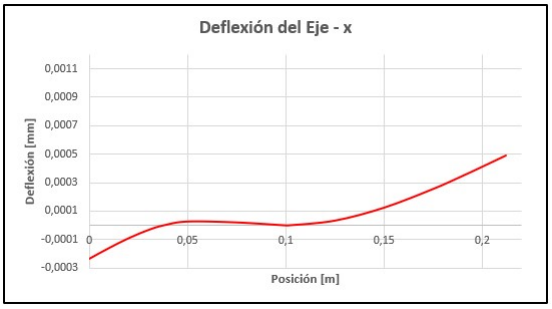



Figura 27: Deflexión en el eje X

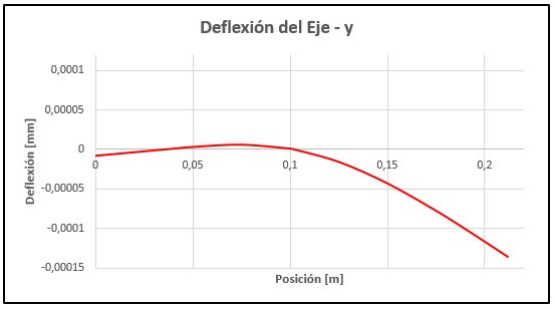



Figura 28: Deflexión en el eje Y

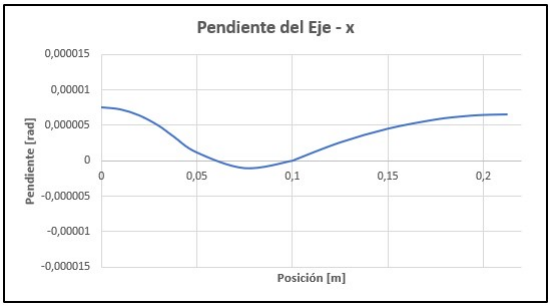



Figura 29: Pendientes en el eje Y

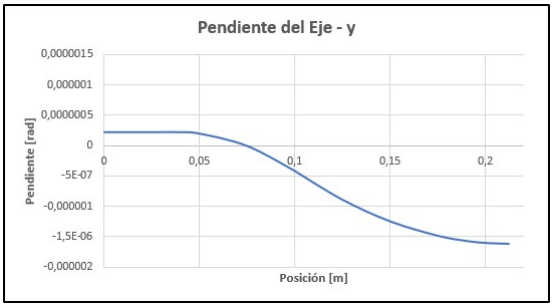



Figura 30: Pendientes en el eje Y

Contemplando estas deflexiones y un factor de seguridad de 1.5, se verifican los diámetros que soportan dichas deflexiones. Al dar diámetros muy bajos, no se da la necesidad de variar las dimensiones del eje. Por último se calcula la velocidad crítica, a partir de deflexiones y cargas. Se obtiene que:

| | ω crit (rad/s) |
|---|---|
| x | 353,4258915 |
| y | 268,820391 |
| total | 444,0430874 |
| rpm | 4240,299138 |

Figura 31: Velocidad Crítica

Al ser tan alta en relación al giro del eje (eje lento), se tiene la seguridad de que nunca se entrará en resonancia con dicha velocidad. Esto concluye el diseño del eje.

## 5.6. Chumaceras

Para la selección de chumaceras se tuvo en cuenta los pasos que da el catalogo de SKF y los diámetros estándar que resultaron del eje se busco un rodamiento de diámetro interior de 25mm, se ingresaron las cargas que resultan de las reacciones del análisis del eje y resultaron que hay muchas referencias capaces de proporcionar el soporte necesario para el funcionamiento del sistema. Por lo anterior se investigó con distribuidores en Bogota respecto a las referencias que manejan y al tener un catalogo reducido se optó por las chumaceras SY 25 TF, las cuales están selladas y sus aplicaciones son relacionadas al tipo de maquinaria que estamos haciendo, además su vida útil es elevada y la velocidad critica se aleja de la de operación así que funcionan perfectamente respecto a lo que se requería, a continuación se observa la chumacera seleccionada.

SY 25 TF

Unidad de rodamientos de bolas con soporte de pie con aro interior prolongado y fijación con tornillos, fundición, normas ISO

Las unidades de rodamientos de bolas con soporte de pie están formadas por un rodamiento de inserción montado en un soporte de fundición que puede atornillarse a una superficie de apoyo. Esta versión es adecuada para aplicaciones con sentidos de giro constantes y alternados. Tiene un aro interior prolongado en ambos lados, y se fija en el eje ajustando un tornillo de fijación en el aro interior, lo que la hace fácil de montar.

- Fuertes
- Listos para montar
- Rodamiento lubricado y sellado
- Fijación rápida en el eje
- Rentables

Figura 32: Chumaceras SY 25 TF [SKF]

## 5.7. Acople Motor

Se requirió un pequeño acople a la salida del motor para poder extender el eje para que quepa la polea que transmite el movimiento, además que aumente el diámetro del mismo eje para poder acoplarlo correctamente al agujero de la polea, este acople debe aguantar cargas de arranque y cargas de frenado, que son menores a las que se expone el eje de la cuchilla, por esto mismo se decidió que este pequeño

acople se realizara en el mismo duraluminio del eje para poder utilizar el mismo material y aprovechar la barra que se tenga.

## 5.8. Mecanismos de transferencia de torque

Para esta sección se realizó la investigación sobre el tipo de mecanismo de transferencia de torque que se iba a utilizar para sujetar las poleas a los ejes, en un principio se tenían dos opciones, la primera y más segura eran los chaveteros, pero estos correspondían a mayor complejidad de mecanizado y montaje, por lo cual se decidió optar por prisioneros, así el eje solo debía ser netamente cilíndrico y según documentos técnicos de Mikipulley [9] se encontró que los prisioneros son buena opción en dos condiciones, primero que haya una correcta selección del diámetro del prisionero respecto al diámetro del eje, para asegurar una correcta indentación y una huella que ayude a esta transmisión de torque tal como se observa en la figura 33, y segundo que se trabajen transferencias relativamente bajas, tal como se muestra en la figura 34, cada diámetro de eje y de prisionero corresponde directamente a un torque máximo aplicable, pues después de esto la probabilidad de deslizamiento es mayor.

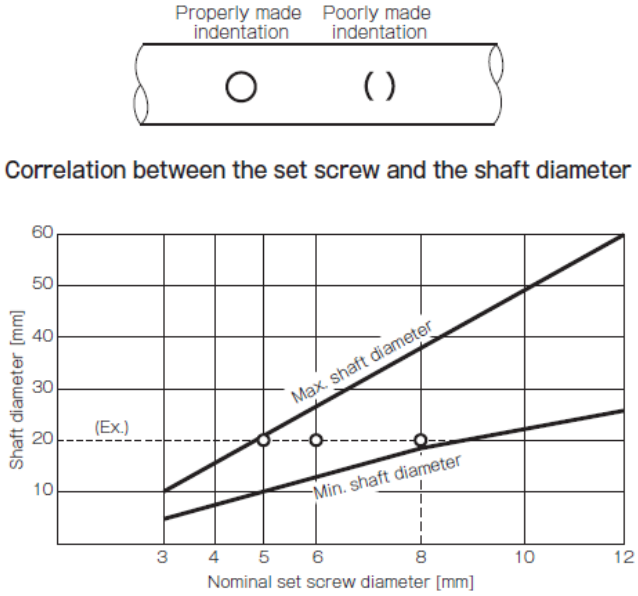



Figura 33: Selección de diámetro de prisionero según eje [9]

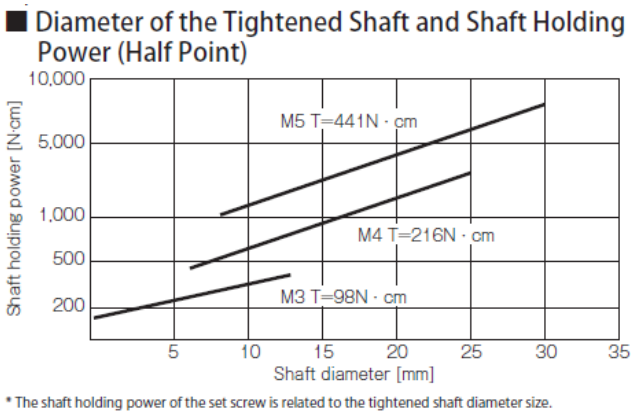



Figura 34: Verificación de torque transmitido por el prisionero [9]

Finalmente para asegurar la transferencia de torque en casos de emergencia como lo podría ser el frenado de emergencias de la cuchilla, se decidió ubicar un segundo prisionero a 60° del primero, lo cual según la gráfica 35 correspondería a un aumento de la capacidad de transmisión en un factor de 1.8, lo que asegura ya finalmente que el funcionamiento de la maquina sea correcto en cualquier condición y evita el uso de chaveteros y chavetas que son mas complejos de usar y reemplazar.

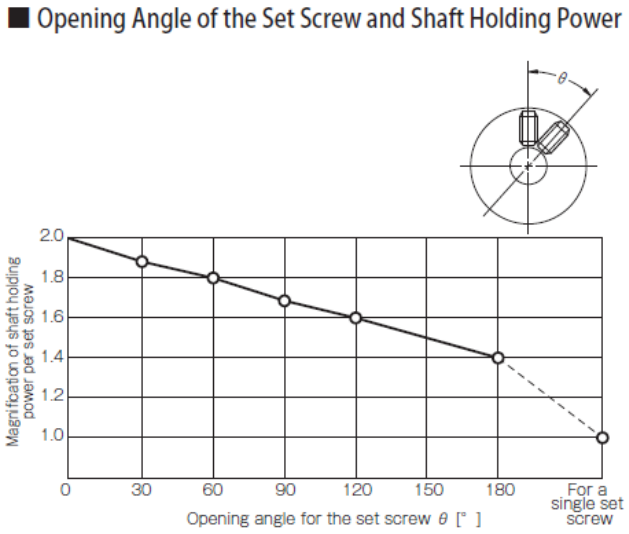



Figura 35: Aumento de transferencia de torque según ángulo del segundo prisionero [9]

# 6. Diseño del sistema de Alimentación y Transporte

Inicialmente se parte de distintas ideas de sujeción y alimentación como se mostró en la sección 4.3. Dos grupos de alternativas principales fueron evaluadas: aquellas con una alimentación netamente manual y otras con una alimentación automática (mediante el uso de bandas o rodillos). El sistema de agarre podría hacer parte del mismo mecanismo de alimentación, sin embargo tras realizar algunas pruebas de aplastamiento con el texturometro se evidencio que con deformaciones muy pequeñas (promedio 3-4 mm) la pulpa se adhiere a cascara,de modo que complica significativamente el proceso de pelado posterior al corte. Por tal motivo se opto por darle prioridad a un mecanismo que no involucrara sujeción directa (grippers,rodillos o resortes de torsión) sino que usara guías en V y aproveche la inercia de alimentación. Tras contemplar en cuanto se incrementaría la cantidad de piezas del prototipo y posibilidad de requerir mayor mantenimiento, se considera una mejor opción, el uso de un sistema manual aunque montado de tal forma que en dado caso sea totalmente posible ser remplazado por una banda de alimentación.

El requerimiento inicial para el sistema de corte era garantizar una alimentación sencilla y el uso de materiales resistentes a corrosión dado por la resolución 2674 de 2013 en el articulo 9, en donde se especifica que los equipos y utensilios para la manipulación de alimentos deben ser de materiales que garanticen una buena resistencia a la corrosión, por lo que desde este punto se selecciono trabajar con un acero inoxidable 304, por su facilidad de acceso y ya que es el más recomendado para la industria de alimentos, apoyada igualmente por una matriz de selección Pugh.

| Material en contacto con el alimento | Resistentes a corrosión | Limpieza y desinfección | Calidad del acabado | Costos | Maquinabilidad | Densidad | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ponderacion--> | 25% | 15% | 20% | 15% | 15% | 10% | 100% |
| Acero inoxidable 304 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0,75 |
| Acero inoxidable 316 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0,75 |
| Aluminio 3004 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0,4 |
| Aluminio 3003 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0,4 |
| Polimeros | -1 | -1 | -1 | 0 | 1 | 1 | -0,35 |

Figura 36: Matriz de selección material sistema de transporte

| Evaluacion material contacto con alimento | Resistentes a corrosión atmosferica | Limpieza y desinfección | Calidad del acabado | Costos | Maquinabilidad | Densidad | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ponderacion -> | 25% | 15% | 20% | 15% | 15% | 10% | 100% |
| -1 | Resistencia a corrosión atmosferica aceptable, sin mebargo mejor resistencia ante otro tipo de corrosion | Es complicado de limpiar, es necesario quimicos e implementos especificos (absorbente a estos quimicos u elementos de limpieza) | Acabado liso con rugosidad notable y absorbente al agua (Ra>80 µin) | El kilo de metro * metro cuesta de 80.000 COP en adelante | Baja maquinabilidad | Densidades mayores a 10 g/cm3 | |
| 0 | Profundidad de picadura en ambientes altamente corrosivos entre 0,1 y 10 mm medida en 15 años | Requiere implementos de buena calidad para su limpieza, y quimicos para lograr una superficie limpia | Acabado liso con rugosidad notable, no poroso y no absorbente (Ra>30 µin) | El kilo de metro * metro esta entre 50.000 y 80.000 COP | Media maquinabilidad | Densidades entre 3 y 10 g/cm3 | |
| 1 | Ante ambientes altamente corrosivos no presenta mas del 15% de manchas ligeras de oxido en la superficie (profundidad de picadura no mayor a 0,1 mm medida en 15 años) | Facil limpieza, sin necesidad de usar ningun tipo de quiemico para lograr una buena limpieza. Con posibilidad de hacer uso de materiales que no dañen el material y de bajo costo (material no ambsorbente de estos materiales) | Acabado liso, no poroso, no absorbente y libre de defectos. (Ra≤30 µin) | El kilo de metro * metro no supera los 50.000 COP | Buena maquinabilidad | Densidades menores o iguales a 3 g/cm3 | |

Figura 37: Criterios de evaluación para la matriz de selección de material

Como se ve en este caso el acero inoxidable 304 y el 316 obtuvieron la misma calificación, y la decisión final se determino por la facilidad de acceso de material por parte del fabricante, a lo cual se llegó a la selección del acero inoxidable 304 para el sistema de transporte y alimentación.

Conservando la idea de sencillez se planeta inicialmente un cajón de correderas que permita desplazar el banano por la cuchilla, hacer el corte, devolverse y volver a alimentar el sistema (como un cajón convencional). Para la selección de estas correderas se hizo igualmente una matriz Pugh

| Rieles | Carga máxima que soportan | Resistencia a la fatiga | Precio | Extensiones máximas | Facilidad de obtención en el mercado | Escalamiento a nivel industrial | Velocidad de accionamiento | Mantenimiento | Material | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ponderacion--> | 15% | 12% | 10% | 10% | 10% | 12% | 18% | 8% | 5% | 100% |
| Correderas Telescopicas | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0,63 |
| Correderas tipo cajón | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | -1 | -1 | -1 | 0 | 0,09 |
| Rieles en U | 1 | 1 | -1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0,53 |
| Rodamientos Lineales | 1 | 1 | -1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0,62 |
| Carriles de Rodillos | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0,55 |

Figura 38: Matriz de selección rieles

| # Criterio -> | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Evaluacion Rieles | Carga máxima que soportan | Resistencia a la fatiga | Precio | Extensiones máximas | Facilidad de obtención en el mercado | Escalamiento a nivel industrial | Velocidad de accionamiento | Mantenimiento | Material | Total |
| Ponderacion -> | 15% | 12% | 10% | 10% | 10% | 12% | 18% | 8% | 5% | 100% |
| -1 | El riel por si mismo no es capaz de soportar la carga que idealmente se moverá y se deben o comprar más de un riel o ayudarlo con algun soporte adicional | El riel falla a menos de 18.000 ciclos | El precio en el mercado supera los $ 50.000 COP por riel | La corredera por si sola no supera los 25 cm | Se debe importar | No tiene usos industriales | El riel no se puede desplazar a altas velocidades además se traba o desalinea con relativa facilidad | El mantenimiento de los rieles implica cambiarlos totalmente o afectar parte de las estructura | El material no es resistente a la corrosión, y se le debe realizar un procedimiento adicional | |
| 0 | El riel es capaz de soportar la carga que idealmente se moverá | El riel falla entre los 18.000 y 27.000 ciclos | El precio en el es mercado es mayor a los $10.000 COP y menor a los $50.000 COP | La corredera desliza entre 25 y 50 cm | Se encuentra a nivel nacional | Se puede usar en operaciones industriales de más alto volumen de producción | El riel se puede desplazar a altas velocidades con una media probabilidad de que se desalinie y/o trabe | El mantenimiento de los rieles implica cambiarlos pero no afecta la estructura | El material es resistente a la corrosión | |
| 1 | El riel es capaz de soportar más carga de la que idealmente se movera | El riel aguanta más de 27.000 ciclos | El precio en el es mercado es menor a los $10.000 COP | La corredera desliza por si sola más de 50 cm | Se encuentra a nivel nacional y se puede ubicar en almacenes de cadena en Bogotá | Se puede usar en operaciones industriales de más alto volumen de producción y permitiria automatización | El riel se puede desplazar a altas velocidades con una baja probabilidad de que se desalinie y/o trabe | El mantenimiento de los rieles no implica cambiarlos o no totalmente y además no afecta a la estructura | El material es resistente a la corrosión por periodos largos de tiempo | |

Figura 39: Criterios de evaluación para la matriz de selección de rieles

Como se puede ver la alternativa ganadora fue la corredera telescópica, que por su facilidad de montaje y bajo costo la hacen la mejor alternativa solución para este caso. Una vez seleccionado tanto material como elemento que permitiera el movimiento se inicio el diseño de la configuración de este cajón. Por lo visto en la sección 4.3, la mejor configuración para el corte efectivo del banano son las placas en V, por lo cual se establece esta como geometría inicial a conservar. En seguida el montaje de las correderas se tomo como paralelo a estas placas, lo que indica que debe haber presencia de una base de este cajón que este sujetada y estática para permitir de alguna forma el movimiento. Ya que se sabe que las platinas en V son la mejor alternativa, la cuestión a tratar es la inclinación de estas placas, pues se realizo un esquema teniendo en cuenta los datos recolectados en las mediciones dimensionales de del banano promedio, mas específicamente el espesor máximo que podrían llegar a tener.

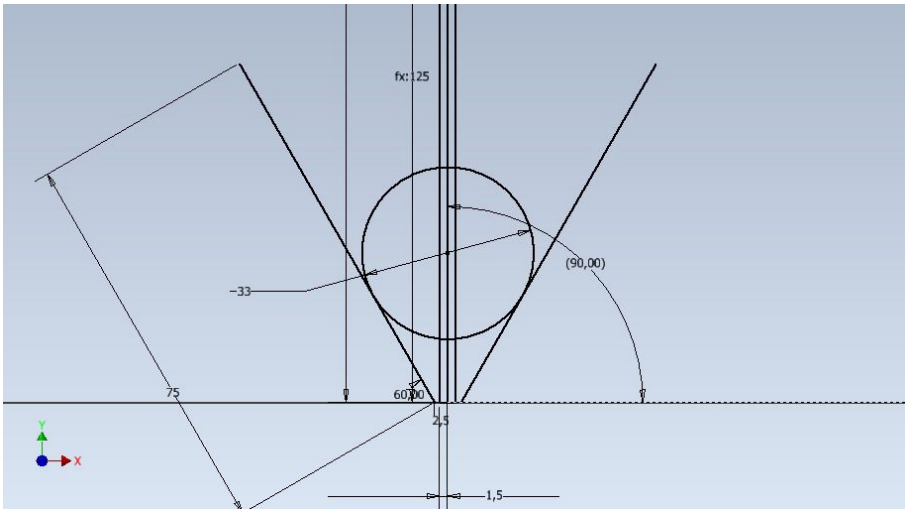



Figura 40: Esquema geométrico placas en V

Para conseguir una altura razonable del banano con respecto a la esquina inferior, un acceso razonable y una buena sujeción, se selecciono un ángulo para las placas en V de 60° con respecto a la horizontal, adicionalmente, con el espesor de la cuchilla seleccionada se estableció un juego entre apoyos de 10 mm para permitir el paso de esta sin riesgo de contacto y fallo catastrófico.

Ya que se tiene la geometría del cajón establecida se considera el funcionamiento del sistema de forma general, se tiene un cajón que permite el movimiento del banano a lo largo de la cuchilla, se debe asegurar que la intervención del operador con la cuchilla sea mínima, por lo que se procura que el banano este lo mas alejado de la mano del operador. Para este caso se consideran dos placas de empuje que permitan el movimiento del banano lo mas alejado del operador, y que sean adaptables al largo del banano que se corte. De igual forma uno de los aspectos que se debió tener en cuenta fue la opción de que al devolver el cajón el banano cortado no volviera con este. Por esto se tomo la decisión de crear una compuerta que solo permita el paso hacia un lado y lo restrinja hacia el otro lado, permitiendo al banano caer por el agujero hacia la canasta que recolectara el banano cortado.

Por último, la unión entre cada una de estas piezas se hizo a través de tornillos y sujeciones reutilizables (sección 11) para facilidad de desensamble y manteniendo. Por esta razón se realizo una pestaña que permitiera la unión del cajón movible con las correderas,, esta permite el ensamble y desensamble del cajón movible sin necesidad de mover la posición de las correderas.

Finalmente el sistema de transporte completo y sin modificaciones se presenta en la figura 41. La manija de agarre mostrada es de manera provisional, pues en el ensamble se considerara un perfil circular y se adaptara el agarre mas sencillo posible, manteniendo ergonomía, seguridad y comodidad para el operario.

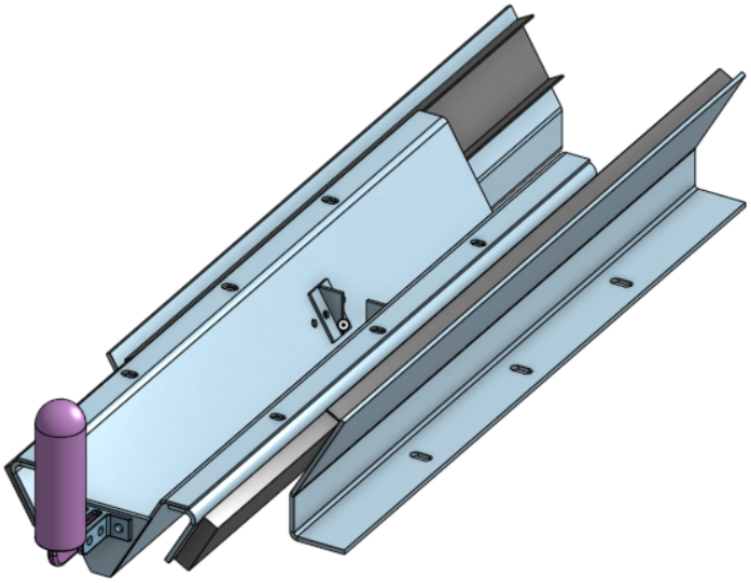


Figura 41: Sistema de alimentación y transporte

Cabe mencionar que las platinas seleccionadas para realizar los dobleces son de calibre comercialmente accesibles con la posibilidad de manejar los ángulo y radio de doblez establecidos en el diseño de este sistema (Calibre 24 y 11). Para las placas de empuje se considero un calibre mucho mayor ya que requerían de soldadura para su ensamble.

Como una de las recomendaciones del cliente fue pensar en una futura escalabilidad de la maquina para poder operar con otros tipos de frutas u añadir mejoras, se plantea la opción de incorporar bandas transportadoras en V. Esta futura adaptación podría remplazar al cajón de transporte, con la ventaja de poder incrementar la tasa de corte y aumentar el nivel de automatización. La adaptación evidentemente implicaría una inversión extra y la necesidad de acoplar los motores de las bandas al sistema de control o diseñar otro aparte. Las dimensiones actuales permitirían dicha adaptación como se muestra en la figura 42

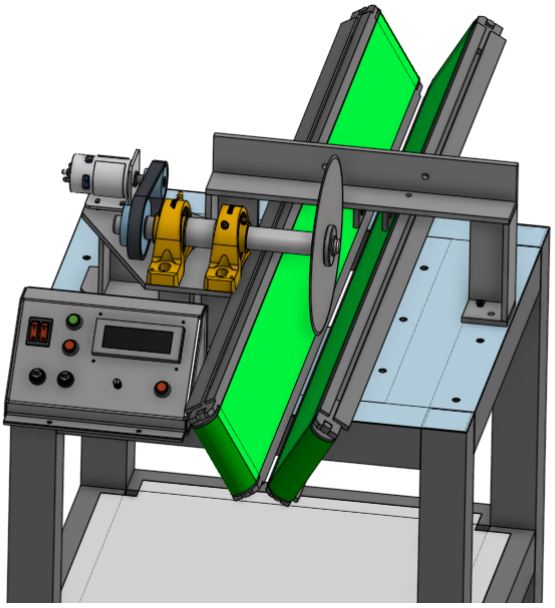


Figura 42: Posible adaptación de Bandas transportadoras

# 7. Diseño del sistema de Control

## 7.1. Selección del motor

Con base en los parámetros de diseño del sistema de corte, es posible poder hacer una indagación en el mercado para decidir qué motor es posible seleccionar para este caso.

Primero que todo, debido a la naturaleza de uso de esta máquina, no se plantea usar motores de corriente alterna debido a que se considera que la capacidad de uso no es lo necesariamente alta como para implementar este tipo de motores. De este modo, se van a analizar únicamente el rango de motores DC disponibles en el mercado que cumplan con las condiciones requeridas.

### 7.1.1. Consideraciones Iniciales

Para llevar a cabo el proceso de selección del motor, es necesario tener en cuenta varios factores clave que garantizarán el rendimiento óptimo de la máquina. A continuación, se presentan las consideraciones necesarias:

1. **Velocidad requerida**: La velocidad angular necesaria para el funcionamiento adecuado de la máquina es un factor determinante. En este caso, se ha establecido una velocidad de 4500 RPM como requisito para realizar el corte longitudinal de bananos de manera eficiente y precisa.

2. **Torque requerido**: El torque es la fuerza rotativa necesaria para impulsar el movimiento de la máquina. Es fundamental calcular el torque requerido para llevar a cabo el corte longitudinal de los bananos de manera efectiva. Este cálculo dependerá de diversos factores, como la resistencia del banano y el diseño de la máquina.

3. **Potencia requerida**: La potencia del motor está directamente relacionada con la velocidad y el torque requeridos. Es necesario determinar la potencia necesaria para cumplir con los requisitos de corte de la máquina. La potencia se calcula mediante la fórmula:

$$P = \tau \cdot \omega \tag{1}$$

   Donde $P$ representa la potencia requerida en vatios (W), $\tau$ es el torque requerido en newton-metros (Nm), y $\omega$ es la velocidad angular requerida en radianes por segundo (rad/s).

4. **Compatibilidad con la fuente de alimentación**: Asegurar la compatibilidad del motor con la fuente de alimentación disponible es crucial. En este caso, se cuenta con una fuente de 24 voltios y 15 amperios. Es necesario seleccionar un motor que pueda operar de manera eficiente y segura con estos valores de voltaje y corriente.

5. **Eficiencia y rendimiento del motor**: La eficiencia del motor es un factor determinante en su rendimiento global. Se busca seleccionar un motor con una alta eficiencia para minimizar las pérdidas de energía y maximizar la eficacia de la máquina. Se recomienda consultar las especificaciones técnicas del motor para evaluar su eficiencia y compararla con otros modelos disponibles en el mercado.

6. **Dimensiones y características físicas**: Las dimensiones y características físicas del motor deben considerarse cuidadosamente para garantizar su adecuada integración en el diseño de la máquina de corte de bananos. Aspectos como el tamaño, el peso, el tipo de eje (en este caso, se requiere un eje en D) y otras especificaciones físicas relevantes deben ser tenidos en cuenta para asegurar la compatibilidad y funcionalidad del motor seleccionado.

### 7.1.2. Matriz de Selección

| Requerimientos | Costo | Dimensión | Adaptabilidad | Ruido | Potencia | Escalabilidad | Controlabilidad | Vida útil | Implementabilidad | Documentación | Mantenimiento | Ponderación |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Porcentaje | 15% | 10% | 10% | 5% | 10% | 10% | 5% | 10% | 10% | 10% | 5% | 100% |
| Motor DC 390 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -0,15 |
| Motor DC 540 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | -1 | 1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -0,25 |
| Motor DC 775 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0,3 |
| Siemens 1LA7 080-2YC60 | -1 | -1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0,1 |
| Gear Motor 4IK30RGN-A 4GN15K | -1 | -1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0,1 |

Figura 43: Matriz de selección motor

| | Costo | Dimensión | Adaptabilidad | Ruido | Potencia | Escalabilidad | Controlabilidad | Vida útil | Implementabilidad | Documentación | Mantenimiento |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Porcentaje | 15% | 10% | 10% | 5% | 10% | 10% | 5% | 10% | 10% | 10% | 5% |
| -1 | Costo comercial mayor a $200.000 | Costo comercial mayor a $200.000 | Requiere de un montaje físico externo para implementación | Voltaje operacional mayor a 5V | No se tiene experiencia con la programación del dispositivo y no se encuentra documentación facilmente. | No integra periféricos de entrada y salida para integración con su programción | No está en la capacidad de poder implementar programas más complejos en el desarrollo futuro del producto | Vida útil limitada o confiabilidad deficiente. | Dificultades significativas en la implementación y falta de compatibilidad. | Documentación técnica completa | Acceso a repuestos y soporte confiables. |
| 0 | Costo comercial entre $20.000 y $200.000 | Costo comercial entre $50.000 y $100.000 | Requiere parcialmente de un montaje físico externo para implementación | Voltaje operacional nominal de 5V | Se tiene experiencia con la programación del dispositivo o se encuentra documentación facilmente. | Posee ciertos periféricos de entrada y salida para integración con su programción | Puede soportar programaciones un poco más complejas en el desarrollo futuro del producto | Vida útil promedio y confiabilidad aceptable. | Implementación estándar y cumplimiento de requisitos básicos de compatibilidad. | Documentación básica | Cumplimiento mínimo de mantenimiento |
| 1 | Costo comercial entre $0 y $20.000 | Costo comercial entre $0 y $20.000 | No requiere de un montaje físico externo para implementación | Voltaje operacional nominal de 3,3V | Se tiene experiencia con la programación del dispositivo y se encuentra documentación facilmente. | Integra periféricos de entrada y salida para integración con su programción | Está en la capacidad de poder implementar programas más complejos en el desarrollo futuro del producto | Motor duradero y altamente confiable. | Implementación sencilla y compatible con diversas aplicaciones. | Falta de documentación adecuada | Dificultades en mantenimiento y obtención de repuestos. |

Figura 44: Matriz de selección motor

A partir de los criterios definidos, se establece como la mejor opción el **motor DC 775**.

### 7.1.3. Cálculos y Selección del Motor

A continuación, se presentan los cálculos y consideraciones necesarios para llevar a cabo la selección del motor DC 775:

1. **Cálculo de la potencia requerida**: Para determinar la potencia necesaria del motor, es necesario multiplicar el torque requerido por la velocidad angular requerida. Este cálculo se realiza utilizando la fórmula:

$$P = \tau \cdot \omega$$

   Donde $P$ es la potencia requerida en vatios (W), $\tau$ es el torque requerido en newton-metros (Nm), y $\omega$ es la velocidad angular requerida en radianes por segundo (rad/s).

2. **Cálculo del torque requerido**: El torque necesario para realizar el corte longitudinal de los bananos depende de varios factores, como la resistencia de los bananos y el diseño de la máquina. Este valor debe calcularse a través de análisis detallados y pruebas específicas relacionadas con el proceso de corte. Una vez obtenido el valor del torque requerido, puede utilizarse en el cálculo de la potencia necesaria.

3. **Compatibilidad con la fuente de alimentación**: Es fundamental verificar que el motor seleccionado sea compatible con la fuente de alimentación disponible. En este caso, se requiere un motor que pueda funcionar de manera óptima con una fuente de 24 voltios y 15 amperios. Se deben consultar las especificaciones técnicas del motor y asegurarse de que tenga una clasificación de voltaje y corriente que se ajuste a estos valores.

4. **Eficiencia y rendimiento**: La eficiencia del motor es un aspecto crítico a considerar. Se recomienda seleccionar un motor con una alta eficiencia para minimizar las pérdidas de energía y maximizar su rendimiento. La consulta de las especificaciones técnicas proporcionadas por el fabricante del motor es fundamental para evaluar su eficiencia y compararla con otros modelos disponibles en el mercado.
5. **Dimensiones y características físicas**: Es esencial verificar las dimensiones y características físicas del motor para asegurar su correcta integración en el diseño de la máquina. Se deben considerar aspectos como el tamaño, el peso, el tipo de eje (en este caso, se requiere un eje en D) y otras especificaciones físicas relevantes. Garantizar la compatibilidad física del motor con el diseño de la máquina es crucial para su correcto funcionamiento.

Es importante tener en cuenta que este proceso de selección del motor debe ser respaldado por un análisis más detallado y específico, así como por la consulta de las especificaciones técnicas proporcionadas por el fabricante del motor. Además, se recomienda realizar pruebas y evaluaciones adicionales para verificar el desempeño y la compatibilidad del motor seleccionado antes de su implementación definitiva en la máquina de corte de bananos.

Concluyendo, en este informe se ha realizado un análisis detallado y extendido del proceso de selección del motor DC 775 para la máquina de corte longitudinal de bananos. Se han considerado aspectos críticos, como los requisitos de velocidad, torque y potencia, así como la compatibilidad con la fuente de alimentación, la eficiencia y el rendimiento del motor, y las dimensiones y características físicas relevantes.

El análisis realizado permite tomar decisiones fundamentadas y garantizar un rendimiento óptimo de la máquina de corte de bananos. No obstante, se recomienda llevar a cabo pruebas adicionales y verificar la compatibilidad específica del motor seleccionado antes de su implementación final. Esto asegurará que se cumplan todos los requisitos y se alcance el máximo rendimiento en el proceso de corte de los bananos.

Figura 45: Motor DC 775 eje en D

### 7.1.4. Selección final

A partir del proveedor del motor, se tienen las dimensiones generales del motor vistas en la figura 46 junto con las siguientes especificaciones:

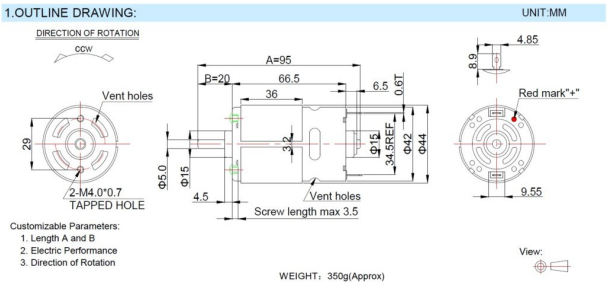



Figura 46: Plano de motor DC 775

- Voltaje: 12-24V (la máxima velocidad se alcanza a 24v)
- Corriente sin carga: 0.27A
- Corriente con carga: 3.25A
- Velocidad: 4500 rpm sin carga
- Diámetro Motor: 45mm
- Step height: 5mm
- Step diameter: 17.4mm
- Longitud del motor: 67mm
- Diámetro del eje: 5mm

Además, se puede conseguir una ficha técnica de curva de torque aproximada para este tipo de motor.

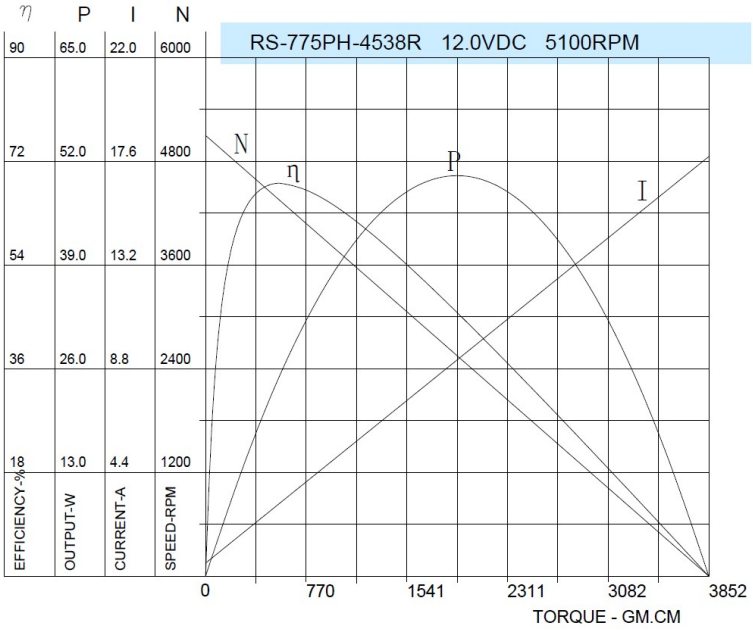



Figura 47: Vurva de torque aproximado motor DC 775

Con todo y lo anterior, se da por finalizada la sección de selección del motor.

### 7.1.5. Controlabilidad y puesta en uso del motor

Ya teniendo un motor DC a implementar, es posible realizar cálculos de controlabilidad y uso del mismo, esto con el fin de garantizar el correcto funcionamiento en la práctica.

Lo primero es calcular un aproximado de la inercia del rotor del motor. Indagando acerca de estos valores, para un motor DC 775 estándar, rango de $1{,}5 \cdot 10^{-5} kgm^2$ a $5{,}5 \cdot 10^{-5} kgm^2$, sin embargo, analizando la figura 46, se toma como una base un cilindro de cobre de $r = 17\,mm$ y $L = 40\,mm$, con una densidad del cobre de $8966\,kg\,m^{-3}$ para el rotor, donde se puede determinar que:

$$\begin{aligned} I_{m_i} =& \frac{1}{2} m\, r^2 \\ I_{m_i} =& \frac{1}{2}(\pi\, r^2\, L\, \rho) r^2 \\ I_{m_i} =& \frac{\pi\, r^4\, L\, \rho}{2} \\ I_{m_i} =& 4{,}2 \cdot 10^{-5} kg \end{aligned}$$

Como se puede evidenciar, este valor de inercia se encuentra en el rango estándar de inercias del rotor. Ahora bien, por seguridad, se va a tener un factor de corrección de $Fs_m = 1{,}2$ en la inercia del motor, tal que se agregue un margen de seguridad a este valor. Dicho esto, se tiene que:

$$I_m = \frac{I_{m_i}}{Fs_m} = 3{,}43 \cdot 10^{-5} kg \tag{2}$$

Ahora bien, calculando la relación de inercia entre el motor y los sistemas de transmisión de potencia, teniendo en cuenta una relación de transmisión de $N = 2$, se debe considerar la inercia total que el motor debe mover:

$$I_t = I_m + \frac{I_{ext}}{N^2} \tag{3}$$

A partir de los valores calculados en la sección 5, entonces se determina que:

$$R_I = \frac{I_{ext}}{I_m\, N^2} = 24{,}78 \tag{4}$$

Este valor está por fuera del rango de controlabilidad óptimo entre 1 y 10. Sin embargo, teniendo en cuenta que no se va a implementar un controlador de perfil de posición, sino un regulador de punto de operación, se considera adecuado esta relación, teniendo en cuenta que debe realizarse un perfil suavizado de posición para llegar al punto de operación.

Ahora, teniendo en cuenta el comportamiento de este tipo de motores, y las limitaciones y capacidades de la cortadora de bananos, se considera que el sistema de control es un control feedforward donde a partir del conocimiento del sistema es posible predecir su comportamiento a plenitud y así ser capaz de controlarlo sin la necesidad de un sistema de retroalimentación de información, o en estos casos un sensor ya sea de voltaje, corriente o velocidad.

## 7.2. Perfil de velocidad

Con base en las observaciones de la sección anterior, es necesario establecer un perfil de velocidad del motor suavizado tal que la operación de este evite sobrepicos innecesarios y pueda poder implementarse de manera adecuada. Según la teoría del control de movimiento, es posible definir perfiles

de velocidades tales que se cumplan las condiciones ideales. Teniendo en cuenta las características del motor, existe una relación lineal entre la velocidad y el voltaje suministrado a las terminales del mismo, lo cual quiere decir que realizar un control del voltaje suministrado provoca el control de velocidad deseado. De este modo, a partir del punto de operación de velocidad máxima indicado por el vendedor del motor de $24V$ y $4500rpm$, se puede generar un perfil suavizado de orden 5 con el fin de obtener perfiles suavizados en Posición, Velocidad, Aceleración y Jerk del motor. Según [10], es posible generar fácilmente estos perfiles de velocidad a partir de seis condiciones iniciales para cualquier problema. Las posiciones, velocidades y aceleraciones iniciales y finales respectivamente. De este modo, teniendo un total de seis puntos, se puede generar un polinomio grado 5 para obtener este perfil suavizado. Con todo y lo anterior, se debe resolver el siguiente sistema:

$$MA = B \tag{5}$$

$$A = M^{-1}B \tag{6}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & t_0 & t_0^2 & t_0^3 & t_0^4 & t_0^5 \\ 0 & 1 & 2t_0 & 3t_0^2 & 4t_0^3 & 5t_0^4 \\ 0 & 0 & 2 & 6t_0 & 12t_0^2 & 20t_0^3 \\ 1 & t_f & t_f^2 & t_f^3 & t_f^4 & t_f^5 \\ 0 & 1 & 2t_f & 3t_f^2 & 4t_f^3 & 5t_f^4 \\ 0 & 0 & 2 & 6t_f & 12t_f^2 & 20t_f^3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} q_0 \\ v_0 \\ ac_0 \\ q_1 \\ v_1 \\ ac_1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

A partir de la solución de A, se tiene que:

$$q_d = a(1) \cdot c + a(2) \cdot t + a(3) \cdot t^2 + a(4) \cdot t^3 + a(5) \cdot t^4 + a(6) \cdot t^5 \tag{8}$$

$$v_d = a(2) \cdot c + 2 \cdot a(3) \cdot t + 3 \cdot a(4) \cdot t^2 + 4 \cdot a(5) \cdot t^3 + 5 \cdot a(6) \cdot t^4 \tag{9}$$

$$a_d = 2 \cdot a(3) \cdot c + 6 \cdot a(4) \cdot t + 12 \cdot a(5) \cdot t^2 + 20 \cdot a(6) \cdot t^3; \tag{10}$$

Donde $c$ es un vector unitario de longitud del vector $t$.

A partir de esto, definiendo un perfil de velocidad tal que se esté controlando el voltaje como parámetro de posición, y no como velocidad, garantiza una continuidad en el *snap* del perfil de movimiento del motor, lo cual es aún más deseable que controlar el voltaje por medio de la velocidad del perfil. Dicho esto, se definen condiciones iniciales y finales de posición, o voltaje de $0$ y $24\,V$, con valores iniciales y finales de derivada y segunda derivada del perfil nulos, para un tiempo total de $5s$. Los resultados son los siguientes:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 5 & 25 & 125 & 625 & 3125 \\ 0 & 1 & 10 & 75 & 500 & 3125 \\ 0 & 0 & 2 & 30 & 300 & 2500 \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 24 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$A = M^{-1}B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1{,}9200 \\ -0{,}5760 \\ 0{,}0461 \end{bmatrix} \tag{13}$$

A partir de esto, definiendo un vector tiempo entre 0 y $5\,s$, se tiene el siguiente perfil de voltaje para el motor visto en la figura 48:

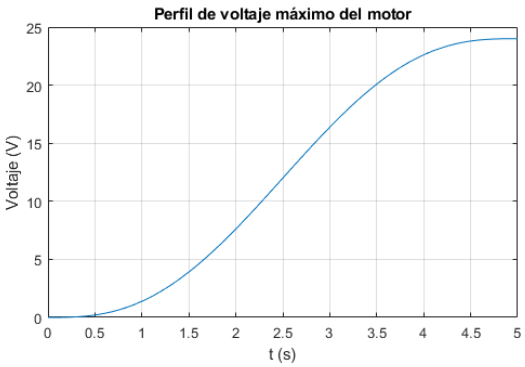



Figura 48: Perfil de voltaje máximo del motor DC 775

Cabe aclarar que este es el perfil de voltaje máximo del motor, por lo cual, si se deseara llegar a un punto de operación de $12\,V$ en vez de $24\,V$, debido a la linealidad del sistema, solamente es necesario escalar los valores del perfil una magnitud $V_d/24$ y lo mismo sucede con el tiempo.

## 7.3. Verificación perfil de velocidad

A partir de toda la información suministrada anteriormente, con el fin de verificar este perfil de velocidad que se va a suministrar al motor, se va a realizar el modelo no lineal del motor en Simulink con el fin de obtener un análisis más a fondo del comportamiento del motor.

Teniendo en cuenta los dos sistemas compuestos dentro de un Motor DC, su sistema eléctrico modelado por la ecuación diferencial:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L}\left(V + Ri + k_e\frac{d\theta}{dt}\right) \tag{14}$$

y su sistema mecánico modelado por la ecuación diferencial:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{1}{J}\left(k_t i - b\frac{d\theta}{dt}\right) \tag{15}$$

A partir de estas dos EDO, es posible simular el comportamiento del motor una vez se tengan las variables del sistema del mismo. Realizando cálculos experimentales de la resistencia de armadura $R_i$, se obtiene un valor de $R_i = 1{,}2\Omega$. La constante $k_e$, que es la misma que $k_i$ teniendo en cuenta unidades SI, se obtiene mediante la información proveida por la tienda de venta del motor tal de que se cumplan las condiciones que estos mencionan del motor, obteniendo que $k_e = k_i = 0{,}0504\,Nm/A = 0{,}0504\,Vs/rad$. $J$ es la inercia total del motor, la cual ya se había determinado. Por último, $B$, similar

a la constante del motor, se sintoniza tal que se cumplan las propiedades esperadas de este motor, resultando en que $B = 2{,}9e{-}5\ Nms/rad$. Con todo y lo anterior, en la figura 49 se puede comprender visualmente en Simulink las conexiones de este modelo.

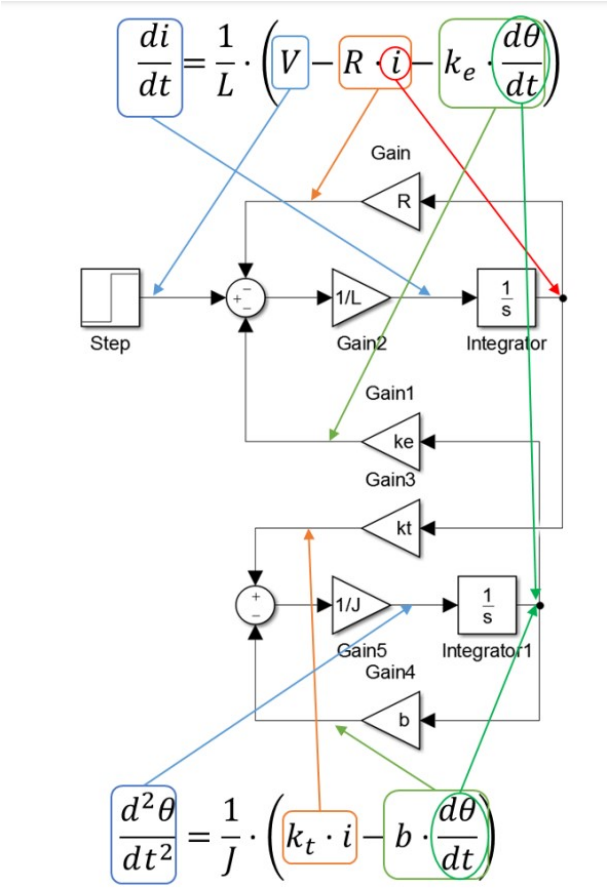



Figura 49: Modelo de motor DC en Simulink [11]

Con todo y lo anterior, se logran extraer datos del comportamiento vistos en las siguientes figuras.

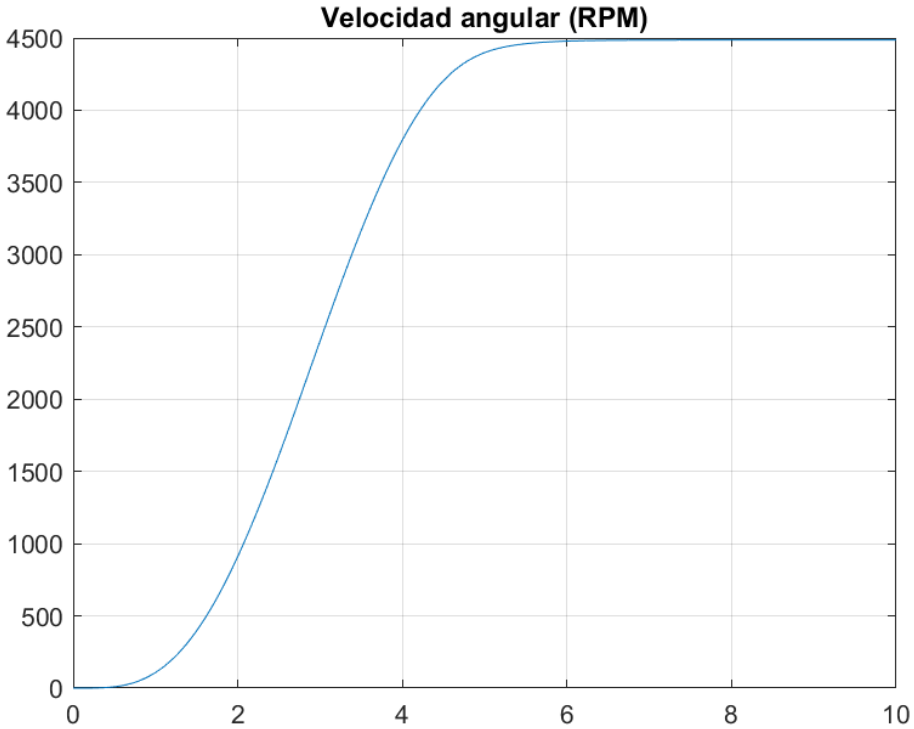



Figura 50: Perfil de velocidad angular del motor en Simulink.

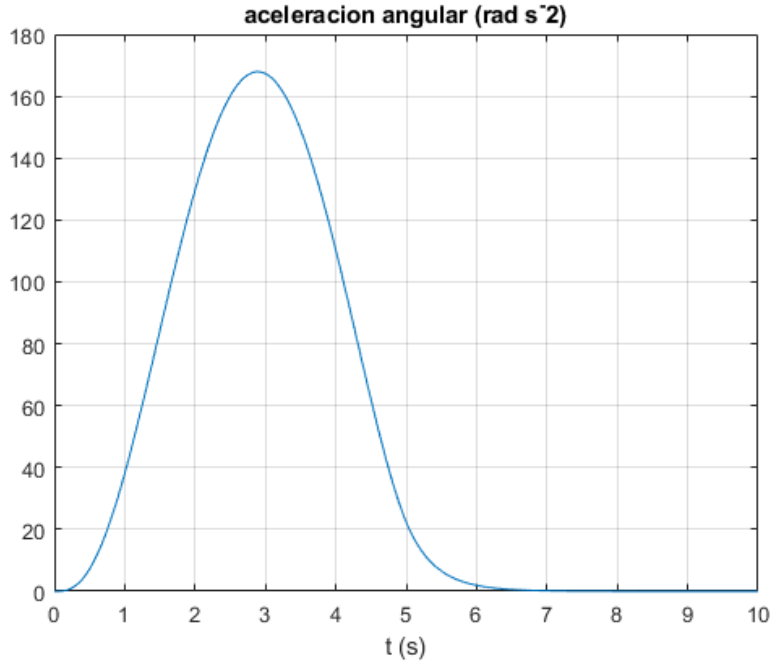



Figura 51: Perfil de aceleración del motor en Simulink.

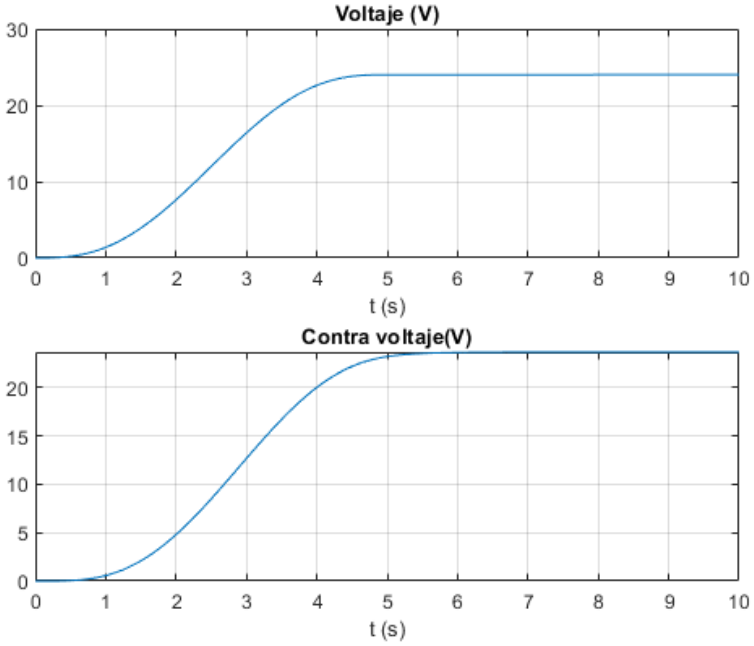



Figura 52: Perfil de voltaje del motor en Simulink.

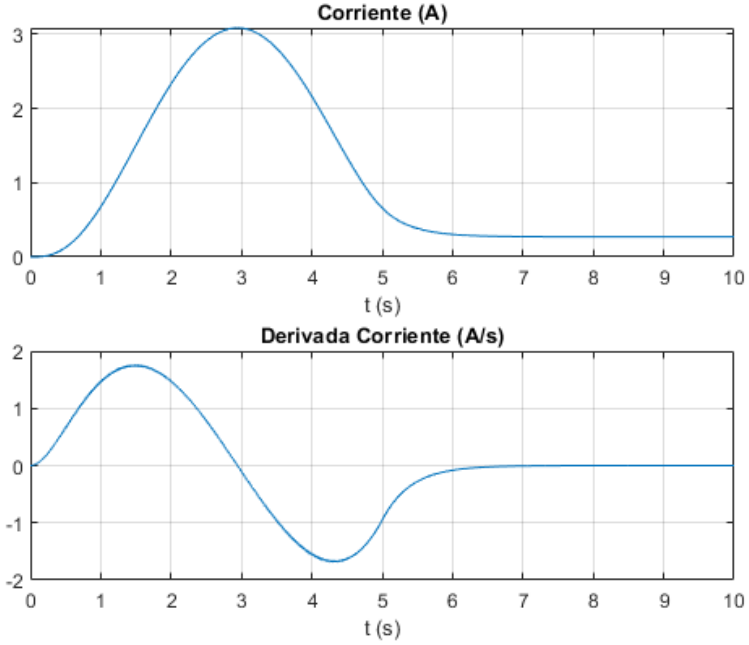



Figura 53: Perfil de corriente del motor en Simulink.

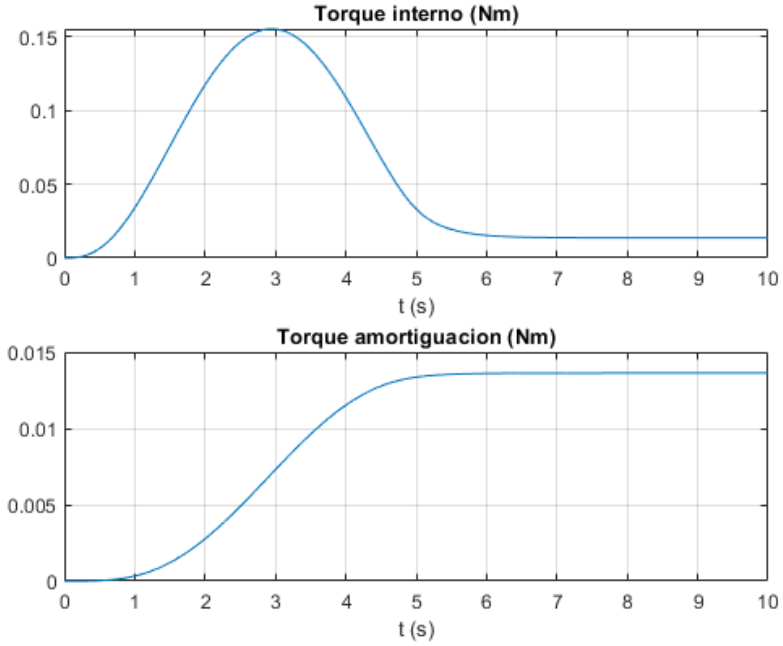



Figura 54: Perfil de torque del motor en Simulink.

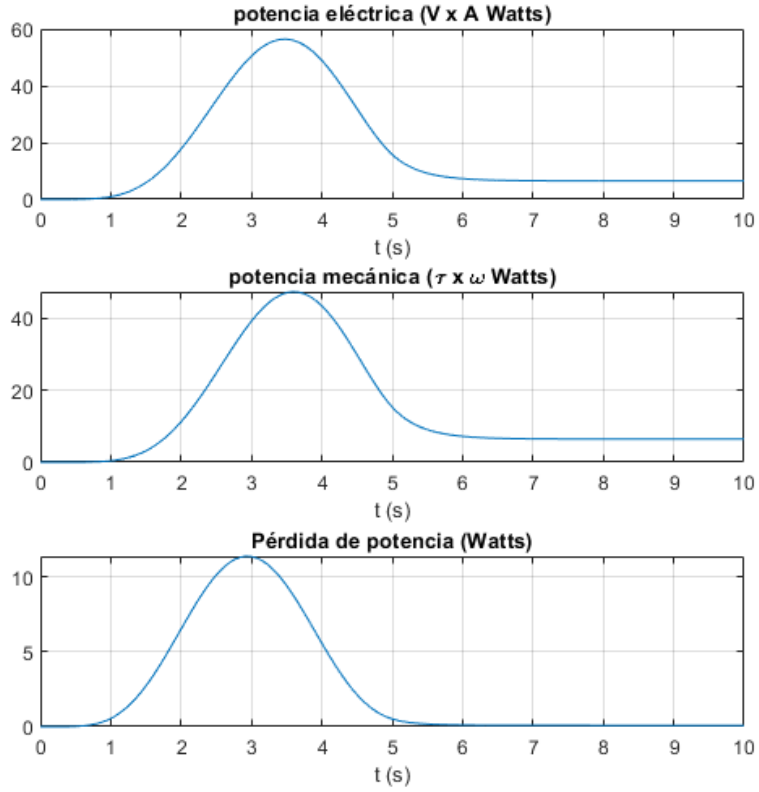



Figura 55: Perfil de potencia del motor en Simulink.

Con todo y lo anterior, se da por finalizada la etapa de control teórica para el motor DC.

# 8. Diseño del sistema electrónico

## 8.1. Selección de microcontrolador

Terminada la sección de diseño del sistema de control, es necesario ser capaz de llevar esa teoría del perfil de voltaje a un sistema real. Para el desarrollo de este sistema, se implementó una selección del microcontrolador

| Requerimientos | Costo | Programador | Montaje físico | Alimentación | Periféricos | Facilidad de uso | Robustez | Escalabilidad | Consumo | Ponderación |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Porcentaje | 10% | 10% | 10% | 10% | 10% | 5% | 10% | 20% | 15% | 100% |
| ESP32 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | -0,2 |
| Arduino nano | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0,05 |
| Raspberry Pi Pico | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0,05 |
| PIC16f15324 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0,05 |
| PIC16F84A | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0,15 |
| PIC18F4550 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0,45 |

Figura 56: Matriz de selección microcontrolador

| | Costo | Costo programador externo | Montaje físico | Alimentación | Perfiféricos | Facilidad de uso | Robustez | Escalabilidad | Consumo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Porcentaje | 10% | 10% | 10% | 10% | 10% | 5% | 10% | 20% | 15% |
| -1 | Costo comercial mayor a $200.000 | Costo comercial mayor a $200.000 | Requiere de un montaje físico externo para implementación | Voltaje operacional mayor a 5V | Presentan deficiencias significativas en términos de eficiencia, fiabilidad o integración con el motor. | No se tiene experiencia con la programación del dispositivo y no se encuentra documentación facilmente. | No integra periféricos de entrada y salida para integración con su programción | No está en la capacidad de poder implementar programas más complejos en el desarrollo futuro del producto | Altamente eficientes y consuman una cantidad mínima de energía para lograr su funcionamiento |
| 0 | Costo comercial entre $20.000 y $200.000 | Costo comercial entre $50.000 y $100.000 | Requiere parcialmente de un montaje físico externo para implementación | Voltaje operacional nominal de 5V | Cumplen con los requisitos básicos y proporcionan un rendimiento promedio sin destacar en términos de eficiencia o características adicionales. | Se tiene experiencia con la programación del dispositivo o se encuentra documentación facilmente. | Posee ciertos periféricos de entrada y salida para integración con su programción | Puede soportar programaciones un poco más complejas en el desarrollo futuro del producto | Cumple con los requisitos estándar de consumo de energía para su tipo y tamaño |
| 1 | Costo comercial entre $0 y $20.000 | Costo comercial entre $0 y $20.000 | No requiere de un montaje físico externo para implementación | Voltaje operacional nominal de 3,3V | Altamente eficientes, confiables y que se integren perfectamente con el motor, mejorando su rendimiento general. | Se tiene experiencia con la programación del dispositivo y se encuentra documentación facilmente. | Integra periféricos de entrada y salida para integración con su programción | Está en la capacidad de poder implementar programas más complejos en el desarrollo futuro del producto | Consumo de energía excesivo o ineficiente en comparación con otros componentes de características similares. |

Figura 57: Criterios matriz de selección microcontrolador

De este modo, se seleccionó el microcontrolador **PIC18F4550.**

## 8.2. Programación del sistema

### 8.2.1. Diseño de máquina de estados finitos (MEF)

Para la implementación de la cortadora del sistema, se realiza una MEF tal que se cumplan estados deseados y acciones esperadas tal que el operario sea capaz de operar adecuadamente la máquina. Esta MEF puede realizarse mediante palabras o equivalentes de etapas y bits de cambio. Esta se evidencia en la figura 58

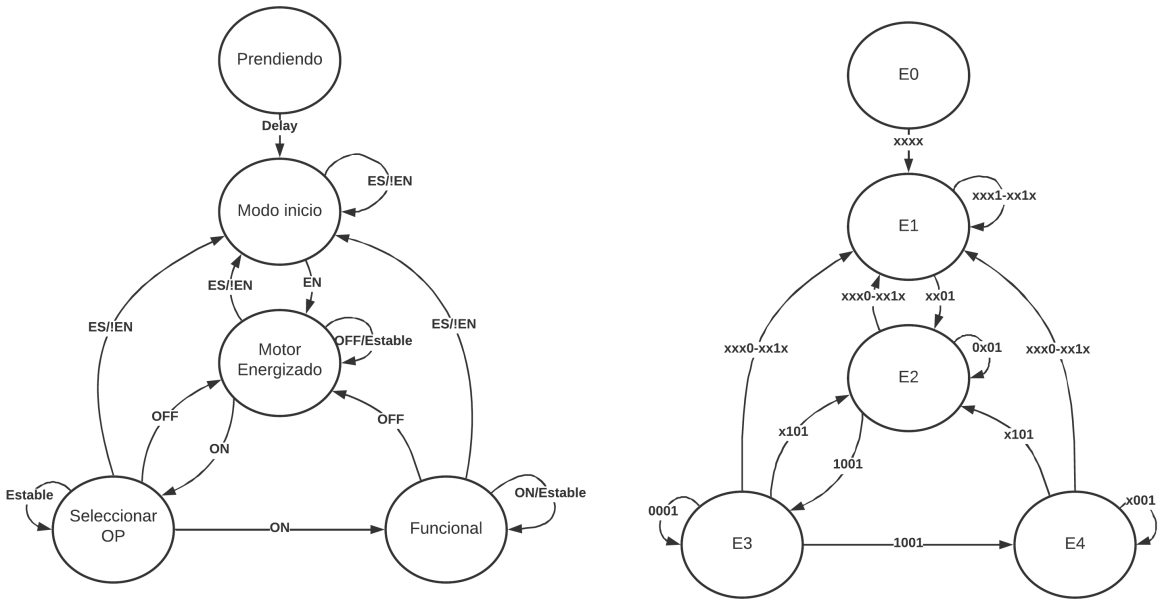



Figura 58: Máquina de estados finitos de la cortadora de bananos

De esta figura, es útil comprender la siguiente información:

**Etapas:**

- E0: Home sistema
- E1: Motores no energizados
- E2: Motores OFF
- E3: Selección OP
- E4: Motores ON

**Accionamientos:**

- a: ON (pulsador)
- b: OFF (pulsador)
- c: Parada de emergencia - ES (Switch)
- d: Motor Energizado - EN (Switch)

A partir de esta información, es posible evidenciar la existencia de botones ON, OFF, EMERGENCY STOP, interruptores de encendido, interfaces de reconocimiento con el usuario, que en este caso se plantea un display LCD20X4, variadores de referencia, entre otros. Por último, para tener una visión más clara del funcionamiento, a partir de la figura 58, es posible desarrollar la tabla de accionamiento de estados, la cual indica todas las poslbes acciones que se van a ejecutar a modo de tabla:

Cuadro 3: Tabla de estados y accionamientos de la MEF

| PS | a | b | c | d | NS |
|---|---|---|---|---|---|
| E0 | x | x | x | x | E1 |
| E1 | x | x | 0 | 0 | E1 |
| | x | x | 1 | 1 | E1 |
| | x | x | 1 | 0 | E1 |
| | x | x | 0 | 1 | E2 |
| E2 | x | x | 0 | 0 | E1 |
| | x | x | 1 | 1 | E1 |
| | x | x | 1 | 0 | E1 |
| | 0 | x | 0 | 1 | E2 |
| | 1 | 1 | 0 | 1 | E2 |
| | 1 | 0 | 0 | 1 | E3 |
| E3 | x | x | 0 | 0 | E1 |
| | x | x | 1 | 1 | E1 |
| | x | x | 1 | 0 | E1 |
| | x | 1 | 0 | 1 | E2 |
| | 0 | 0 | 0 | 1 | E3 |
| | 1 | 0 | 0 | 1 | E4 |
| E4 | x | x | 0 | 0 | E1 |
| | x | x | 1 | 1 | E1 |
| | x | x | 1 | 0 | E1 |
| | x | 1 | 0 | 1 | E2 |
| | x | 0 | 0 | 1 | E4 |

Con esto en mente, se programa una MEF en el software MPLABX V3.3 para el PIC18F4550, la cual se acciona principalmente bajo su teoría de interrupciones del registro RB. Puntualmente sus registros RB0, RB1 y RB2, los cuales se accionan mediante flancos de bajada sin importar el puntero del main, lo cual es ideal para el manejo de interruptores con prioridad más alta que la ejecución del programa, ya que de este modo se permiten cambios de estados sin depender de la finalización del ciclo del estado actual.

Además, se plantea implementar un oscilador interno de 8MHz, esto con el fin de no depender de periféricos como un cristal de cuarzo u otros componentes que podrían afectar negativamente el funcionamiento del PIC en caso de desconexiones o daños de comunicación.

Dicho esto, lo más importante de la programación del PIC es lograr implementar el perfil de voltaje descrito en la sección anterior. Para esto, es necesario discretizar el perfil, el cual se hará en 251 puntos totales. Ahora bien, este microcontrolador cuenta con dos salidas PWM llamadas CCP1 y CCP2 las cuales son totalmente configurables. En este caso se va a implementar la CCP1 bajo una frecuencia de PWM de 4kHz. Planteada esta frecuencia, es necesario realizar el cálculo del valor máximo del registro PR2 y del prescaler del TMR2, ya que a partir de esto es que se puede configurar el PWM. Teniendo en cuenta que PR2 es un registro de 8 bits, este no puede superar un valor de 255, lo cual ayuda a determinar los valores esperados. Estos valores se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$PR2 = \frac{clk}{4f_{pwm}TMR2_{prescaler}} - 1 \tag{16}$$

A partir de los valores ya mencionados, se selecciona un $TMR2_{prescaler} = 1$ tal que:

$$PR2 = \frac{clk}{4f_{pwm}TMR2_{prescaler}} = \frac{4MHz}{4 \cdot 2kHz \cdot 2} - 1 = 249 \tag{17}$$

Debido a que $PR2 = 249 \leq 255$, se puede establecer que se calcula adecuadamente y este PWM es implementable.

Ahora, debido a la discretización del sistema, es importante determinar la sensibilidad del PWM. Teniendo un valor equivalente de $PR2_{max}$ $s = V_{max}$, se calcula esta sensibilidad como:

$$s = \frac{V_{max}}{PR2_{max}} = \frac{24V}{249} = 96{,}4\,mV/unidad \tag{18}$$

Teniendo esta magnitud de sensibilidad, se determina que es una sensibilidad aceptable para la implementación del PWM del motor. De este modo, para implementar el PWM, del perfil de voltaje previamente diseñado, a cada valor discretizado en los 251 se debe escalar a un valor $int(Val \cdot 249/24)$ y adecuadamente casteado a un valor entero para ser implementable en el código.

Con todo y lo anterior, se programa el código en lenguaje C capaz de compilarse por el PIC18F4550. Este está comentado adecuadamente con el fin de poder entender a medida que se recorren las líneas de código. Véase el Anexo B para analizar el código implementado.

### 8.2.2. Verificación MEF

Para determinar el funcionamiento de la MEF diseñada, se plantea realizar en simulación todo el sistema desarrollado en MPLABX. Esto se logra mediante el archivo .hex que se puede exportar del proyecto e importarlo en entornos de simulación, en este caso, en PROTEUS 8.3, el cual permite hacer uso de este proyecto y verificar todas las funcionalidades requeridas y saldos de estados adecuados. En la figura 59 se logra apreciar este simulador generado.

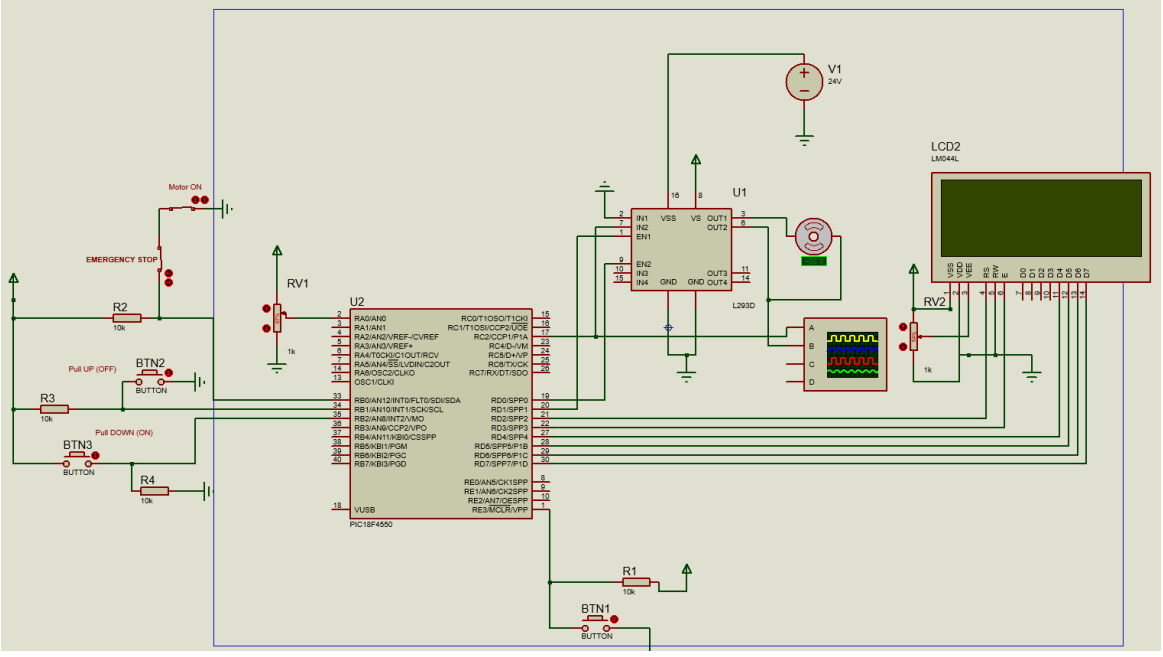



Figura 59: Simulador del circuito de control en Proteus

Mediante la implementación del simulador, y el uso de los interruptores, switches, y displays simulados, es posible verificar el correcto funcionamiento de la MEF mediante el análisis de señales lógicas

de los pines del PIC18F4550, la salida del display 20X4, y la señal PWM que se puede leer mediante el osciloscopio del simulador. Véase de la figura 60 a la figura 65 para comprobar los estados.

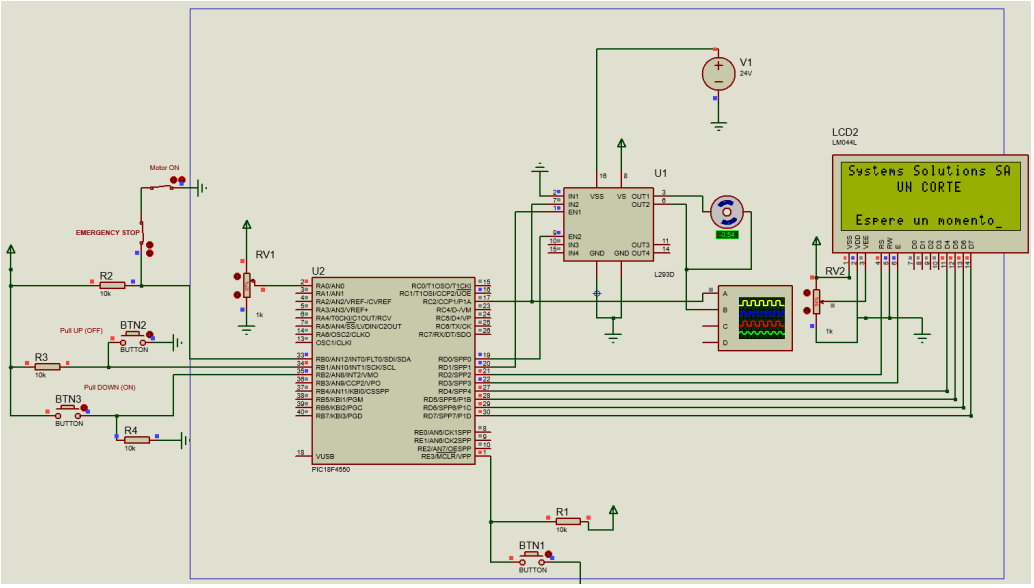



Figura 60: Verificación Etapa 0. Prendiendo la máquina.

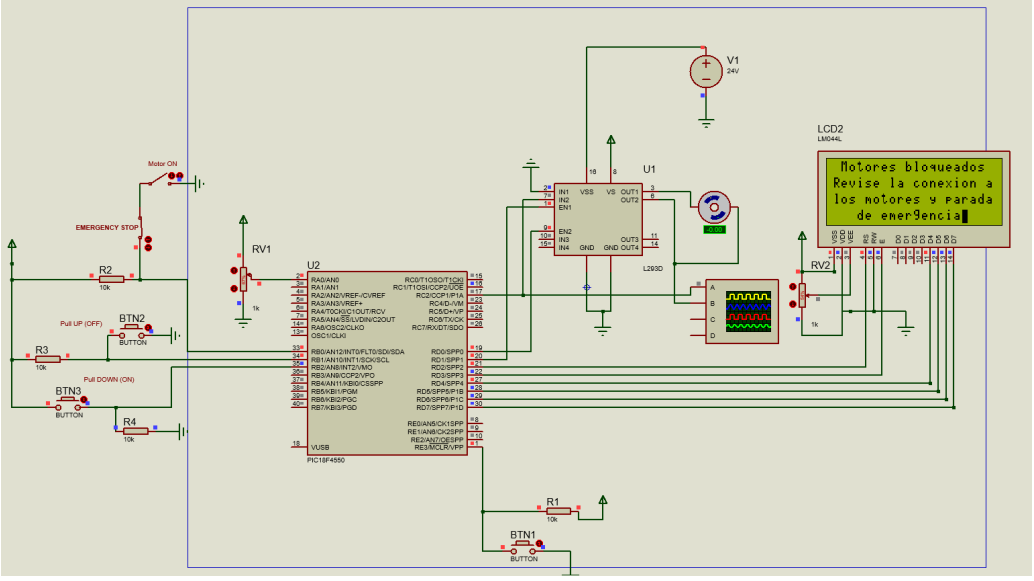



Figura 61: Verificación Etapa 1. Estado de motores bloqueados.

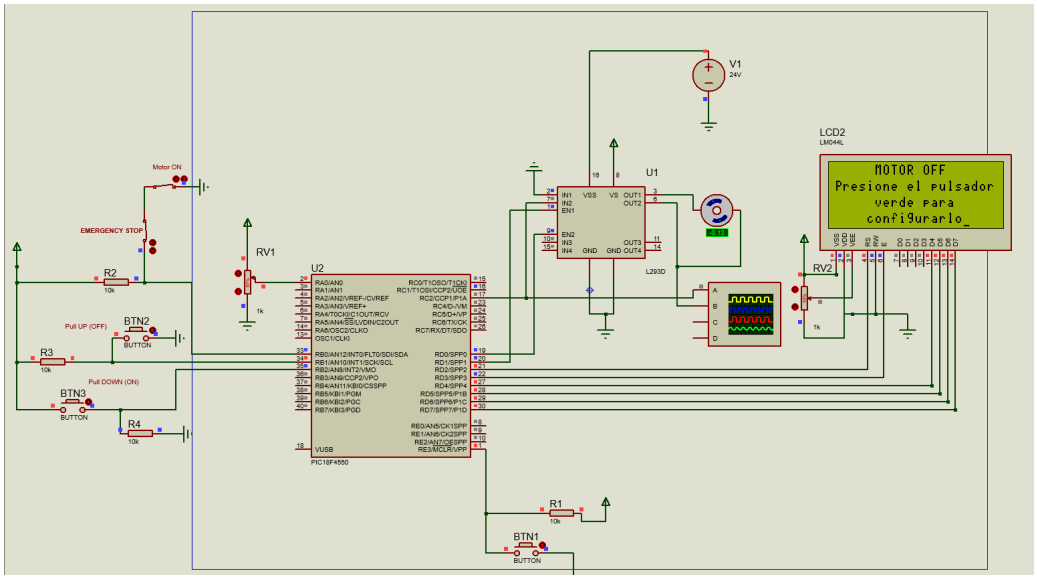



Figura 62: Verificación Etapa 2. Motores OFF.

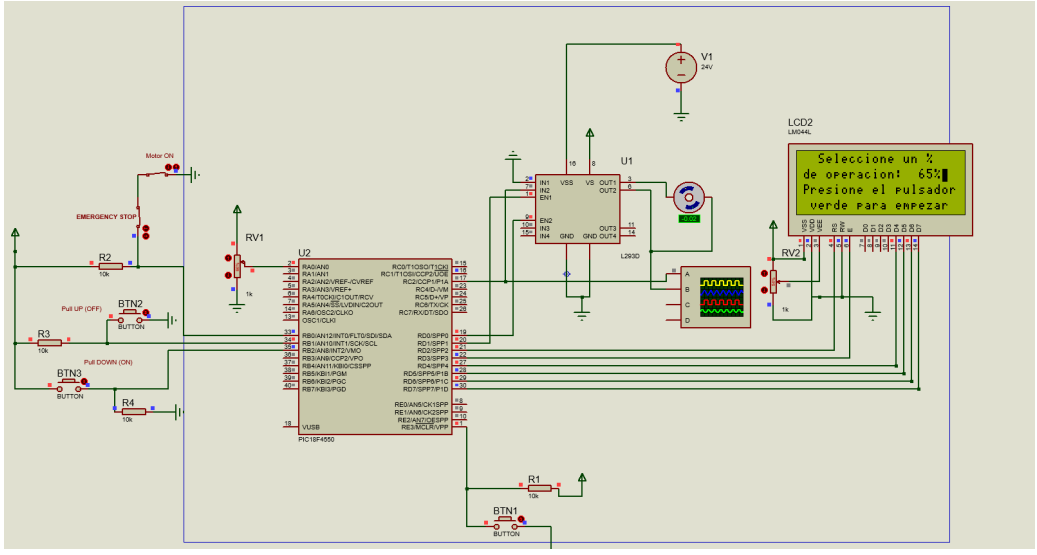



Figura 63: Verificación Etapa 3. Selección de punto de operación.

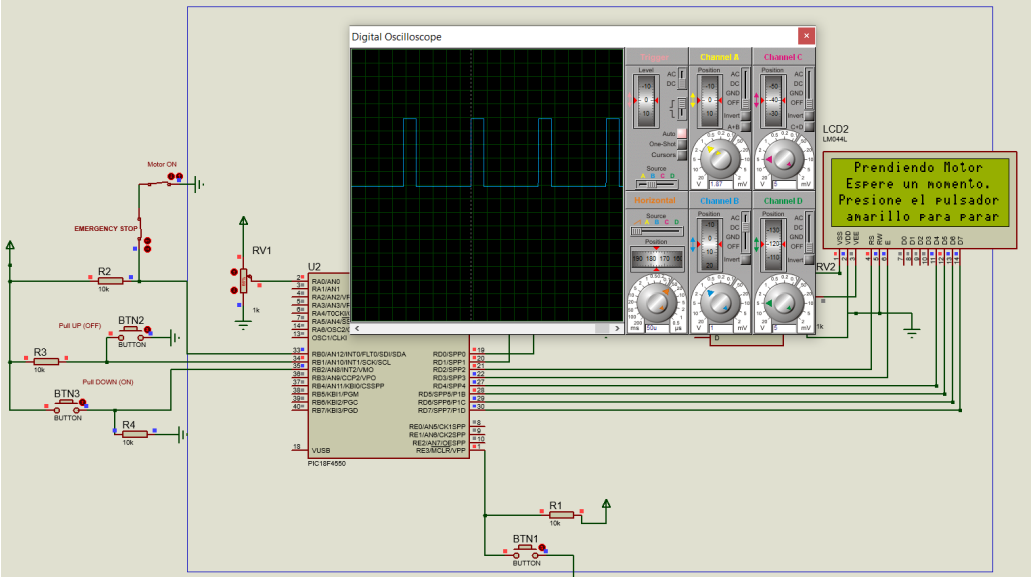



Figura 64: Verificación Etapa 4. Motor prendiendo.

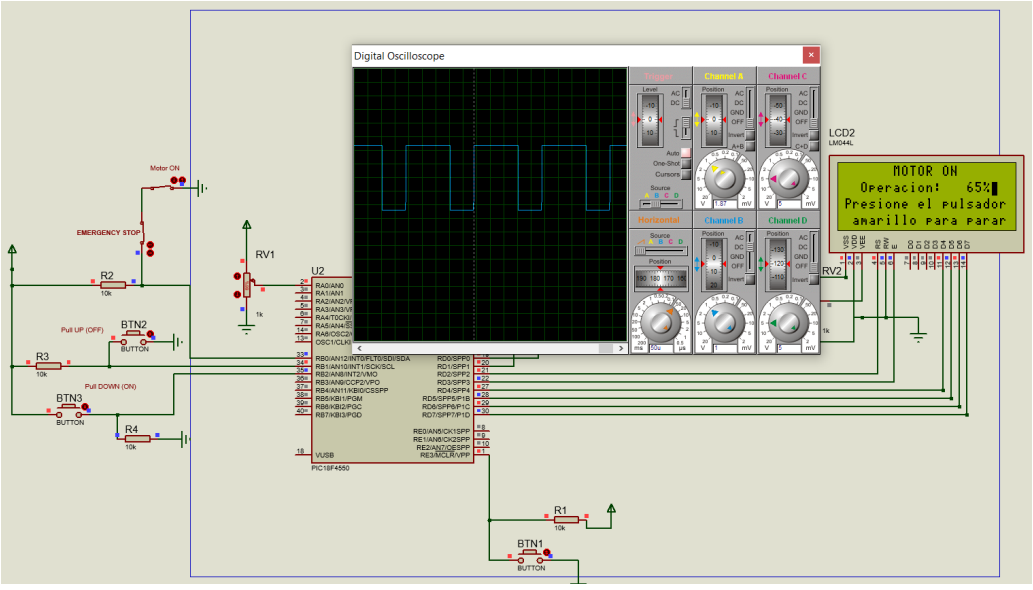



Figura 65: Verificación Etapa 4. Motor prendido.

Si se desea ver esta verificación en funcionamiento, véase el video de **verificación MEF.mp4** anexado en los entregables del proyecto.

## 8.3. Selección de etapa de potencia

Al seleccionar un controlador y fase de potencia para controlar un motor, hay varios aspectos importantes a considerar:

1. Compatibilidad con el motor: Es fundamental asegurarse de que el controlador y la fase de potencia sean compatibles con el tipo y las características eléctricas del motor que se va a controlar. Esto implica verificar las especificaciones del motor, como la tensión de operación, la corriente máxima y la potencia nominal, y asegurarse de que el controlador y la fase de potencia puedan manejar estos requisitos.

2. Tipo de control: Determinar el tipo de control que se necesita para el motor es crucial. Puede ser control de velocidad, control de posición, control de torque, etc. Esto influirá en el tipo de controlador y fase de potencia que se seleccionen, ya que deben ser capaces de proporcionar las funciones y características de control necesarias para el tipo específico de motor.

3. Capacidad de corriente: El controlador y la fase de potencia deben ser capaces de manejar la corriente máxima requerida por el motor. Es esencial verificar las especificaciones del controlador y la fase de potencia para asegurarse de que puedan suministrar la corriente necesaria sin sobrecargarse ni dañarse.

4. Protecciones y seguridad: Es importante considerar las características de protección y seguridad incorporadas en el controlador y la fase de potencia. Estas pueden incluir protección contra sobrecorriente, protección térmica, protección contra cortocircuitos, entre otras. Estas características ayudan a proteger tanto el controlador como el motor de condiciones anormales de operación y posibles daños.

5. Flexibilidad y funcionalidad: Evaluar la flexibilidad y funcionalidad del controlador es importante. Esto incluye aspectos como la capacidad de ajustar parámetros de control, la posibilidad de implementar diferentes modos de operación y la facilidad de integración con otros sistemas o interfaces.

6. Documentación y soporte técnico: Verificar la disponibilidad de documentación técnica, manuales de usuario y soporte técnico por parte del fabricante del controlador y la fase de potencia es crucial. Esto asegura que se pueda obtener la información necesaria y recibir ayuda en caso de problemas o consultas durante el proceso de selección, instalación y operación.

Al considerar estos aspectos, se puede realizar una selección adecuada del controlador y fase de potencia que sean compatibles y cumplan con los requisitos específicos del motor y las necesidades de control. Este proceso garantiza una integración exitosa del controlador del motor con el puente H BTS7960 y asegura un funcionamiento óptimo y seguro del sistema completo.

Adicionalmente, teniendo en cuenta las opciones disponibles y las consideraciones mencionadas, se realiza la matriz de selección para definir la opción en esta fase de diseño.

| Requerimientos | Costo | Dimensión | Facilidad de uso | Confiabilidad | Alimentación | Rango operación | Escalabilidad | Controlabilidad | Necesidad de software | Ponderación |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Porcentaje | 10% | 10% | 5% | 10% | 5% | 10% | 20% | 15% | 15% | 100% |
| Controlador PWM de Velocidad de Motor DC 8-55V 10A | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Controlador PWM de Velocidad de Motor DC 6V-90V 15A | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0,05 |
| Control motor DC, inversor de giro, 24V/3A | 1 | 1 | 0 | -1 | 0 | -1 | 0 | -1 | 0 | -0,15 |
| Controlador PWM de Velocidad de Motor DC 9-50V 2000W 40A | 1 | 1 | -1 | -1 | 0 | 1 | 0 | -1 | 0 | 0 |
| Bts7960 Controlador Motor 43a De Alta Potencia Puente H | 1 | 1 | -1 | -1 | 0 | 1 | 1 | 1 | -1 | 0,35 |
| Módulo L298n Control De Motor Puente H | 1 | 1 | -1 | -1 | 0 | -1 | 1 | 1 | -1 | 0,15 |

Figura 66: Matriz de selección etapa de potencia

| | Costo | Dimensión | Facilidad de uso | Confiabilidad | Alimentación | Rango operación | Escalabilidad | Controlabilidad | Necesidad de software |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Porcentaje | 10% | 10% | 5% | 10% | 5% | 10% | 20% | 15% | 15% |
| -1 | Costo comercial mayor a $200.000 | Costo comercial mayor a $200.000 | Requiere de un montaje físico externo para implementación | Voltaje operacional mayor a 5V | No se tiene experiencia con la programación del dispositivo y no se encuentra documentación facilmente. | No integra periféricos de entrada y salida para integración con su programción | No está en la capacidad de poder implementar programas más complejos en el desarrollo futuro del producto | Controlador con limitaciones en su controlabilidad y funcionalidad. | Dependencia limitada o inexistente de software para su funcionamiento. |
| 0 | Costo comercial entre $20.000 y $200.000 | Costo comercial entre $50.000 y $100.000 | Requiere parcialmente de un montaje físico externo para implementación | Voltaje operacional nominal de 5V | Se tiene experiencia con la programación del dispositivo o se encuentra documentación facilmente. | Posee ciertos periféricos de entrada y salida para integración con su programción | Puede soportar programaciones un poco más complejas en el desarrollo futuro del producto | Controlador con funcionalidad estándar y capacidad aceptable de control. | Requiere software estándar para operación básica. |
| 1 | Costo comercial entre $0 y $20.000 | Costo comercial entre $0 y $20.000 | No requiere de un montaje físico externo para implementación | Voltaje operacional nominal de 3,3V | Se tiene experiencia con la programación del dispositivo y se encuentra documentación facilmente. | Integra periféricos de entrada y salida para integración con su programción | Está en la capacidad de poder implementar programas más complejos en el desarrollo futuro del producto | Controlador altamente controlable y versátil. | No requiere software avanzado para un control óptimo y se dispone de software adecuado. |

Figura 67: Criterios matriz de selección etapa de potencia

## 8.4. Selección de componentes del circuito

El proceso de selección de componentes para el circuito, que incluye el display, pulsadores, switches, bases de seguridad del microcontrolador y portafusibles, es crucial para garantizar el funcionamiento óptimo y confiable del sistema. Durante este proceso, se deben tener en cuenta varios criterios para tomar decisiones informadas:

En primer lugar, es fundamental revisar las especificaciones técnicas de cada componente. Estas especificaciones incluyen detalles como la tensión de operación, corriente nominal, tipo de señal compatible, tipo de conexión, dimensiones físicas y requerimientos de montaje. Comprobar que estas especificaciones sean compatibles con los requisitos del circuito y del sistema en general es esencial para evitar incompatibilidades y problemas posteriores.

Además de las especificaciones técnicas, es importante considerar la funcionalidad y compatibilidad de los componentes. Por ejemplo, el display seleccionado debe cumplir con los requisitos específicos del proyecto, como la capacidad de mostrar los datos necesarios con la resolución y brillo adecuados. Los pulsadores y switches deben ser adecuados para la función que desempeñarán en el circuito, y deben ser compatibles con las señales de entrada o salida requeridas.

La calidad y confiabilidad de los componentes también deben ser evaluadas. Es recomendable seleccionar componentes de proveedores reconocidos y confiables en la industria. Esto asegura que los componentes cumplan con altos estándares de calidad y brinden un rendimiento duradero. Asimismo, es importante considerar la disponibilidad de los componentes y su costo para asegurarse de que se ajusten al presupuesto y se puedan adquirir fácilmente.

La documentación técnica y el soporte ofrecido por los proveedores también son aspectos cruciales. Contar con una documentación clara y completa, como hojas de datos y manuales de usuario, facilita el proceso de integración y solución de problemas. Además, contar con un soporte técnico eficiente y receptivo es invaluable para resolver consultas o dificultades durante la selección, integración y uso de los componentes.

Por último, si el circuito debe cumplir con normativas o estándares específicos, es importante asegurarse de que los componentes seleccionados cumplan con estos requisitos. Verificar si los componentes cuentan con las certificaciones pertinentes garantiza la conformidad del circuito y evita problemas legales o de seguridad.

Teniendo en cuenta estos criterios, se puede realizar una selección adecuada de los componentes para el circuito. Esto asegura un funcionamiento óptimo, confiable y seguro del sistema en su conjunto, optimizando así la experiencia del usuario y la calidad del producto final.

## 8.5. Diseño PCBs

Teniendo en cuenta los parámetros, componentes y circuitos mostrados anteriormente, se diseñan las PCBs (*Printed Circuit Board*) usando el software libre KiCad 7.0.

Para comenzar se realiza el diagrama esquemático en el que se establecen las conexiones de los elementos, en este punto también se seleccionan los componentes finales que conformarán la pieza, por lo que se debe tener en cuenta factores como su disponibilidad en el mercado, tamaño, entre otros. En la figuras 68 y 69 se muestran los resultados de esta etapa.

Cabe resaltar que se tienen dos PCBs, la primera (PCB 1) corresponde a la principal; en esta se ubica el microcontrolador, y las salidas tanto del display, como las que están destinadas al control del motor. Adicionalmente, se tiene la segunda, PCB 2, que es la que va ubicada en el periférico donde se tienen los botones de control (*human interface*), en esta se encuentran las vías que conectan los pines del controlador, con las entradas del display, y también a esta se conectan los botones con los que el operario tendrá control de la máquina y sus diferentes funciones.

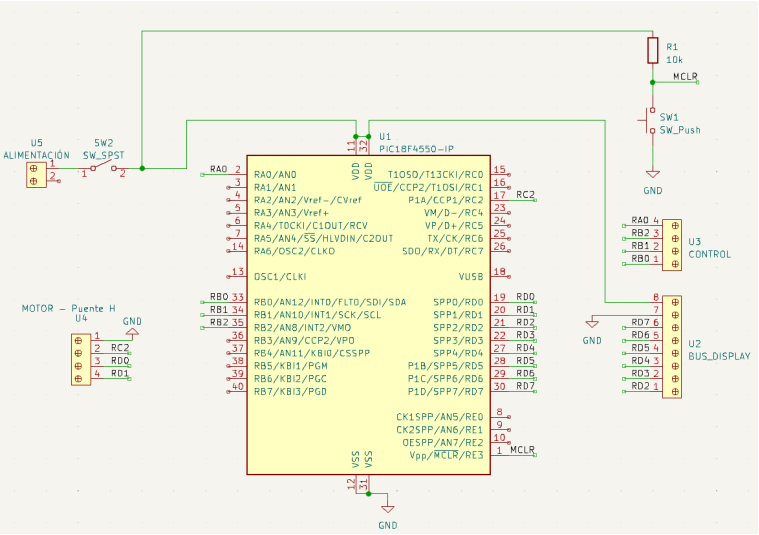



Figura 68: Esquemático PCB 1

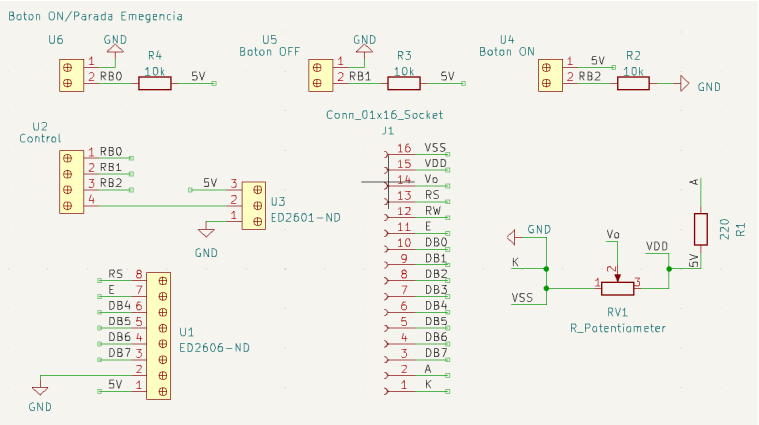



Figura 69: Esquemático PCB 2

El siguiente paso consiste en ubicar los componentes de forma tal que sea adecuado su enrutamiento y no se presenten cruces entre las pistas, esto teniendo en cuenta las salidas de cables, botones, etc. Posteriormente, se deben trazar las rutas que seguirán las pistas de la PCB, las cuales deben tener un ancho tal que resistan la corriente máxima que pasará por ellas. La ecuación 19 da como resultado este valor.

$$W = \frac{\left(\frac{I_{max}}{K_1 \Delta T^{K_2}}\right)^{\frac{1}{K_3}}}{1{,}378L} \tag{19}$$

En donde:

- W es el ancho de pista
- Imax es la corriente máxima que pasará por la pista.
- $\Delta T$ es la variación máxima de temperatura.
- L es el espesor de la capa de cobre.
- K1, K2 y K3 son constantes que dependen de si el cálculo se está haciendo para una pista externa (capa superior e inferior) o una capa interna (capas intermedias en un circuito multicapa). Los valores de estas se pueden ver en la tabla 4.

Cuadro 4: Tabla de Coeficientes para el cálculo del ancho de pista

| | **Interna** | **Externa** |
|---|---|---|
| $K_1$ | 0.0150 | 0.0647 |
| $K_2$ | 0.5453 | 0.4281 |
| $K_3$ | 0.7349 | 0.6732 |

Teniendo en cuenta lo anterior, el resultado de la ecuación 19 da como resultado:

Cuadro 5: Ancho de pista utilizado

| **Ancho de Pista [mm]** | **Corriente [A]** |
|---|---|
| 1 | 15 |
| 0.8 | 10 |

Otros criterios y buenas técnicas de creación de PCB que se tuvieron en cuenta es no enrutar en ángulos rectos, garantizar una separación mínima de 0.5mm entre caminos y finalmente conectar a tierra partes de la placa que estén libres, esto con el fin de un alivio térmico y como protección ante descargas.

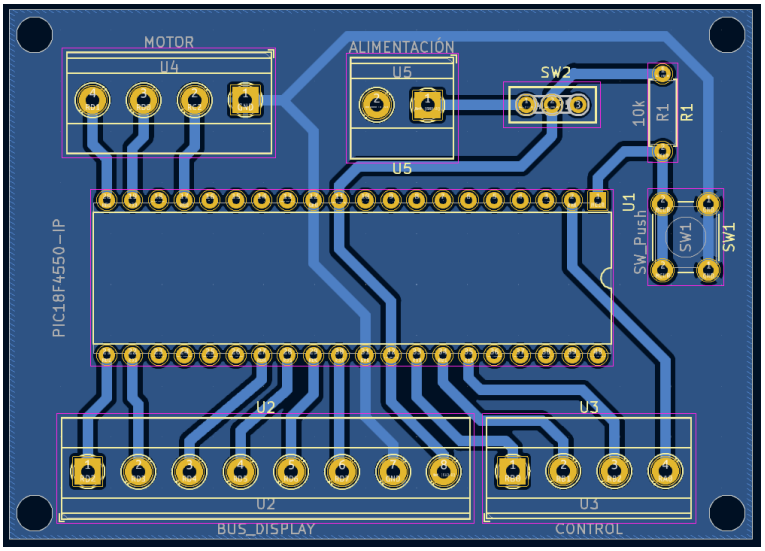



Figura 70: Distribución PCB 1

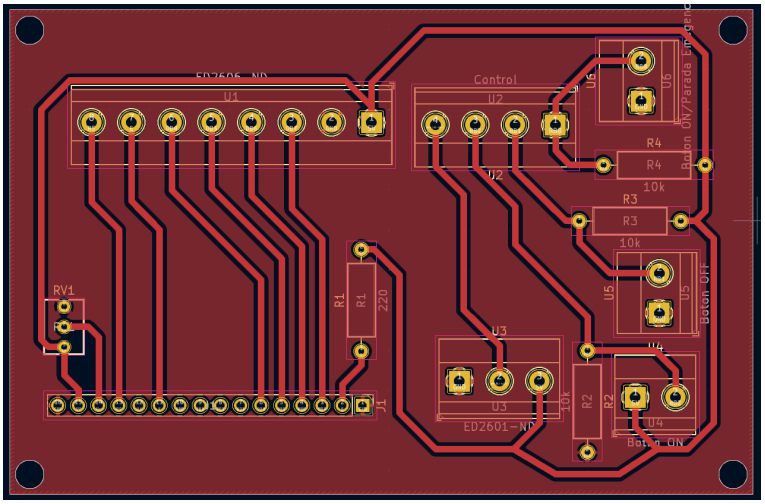
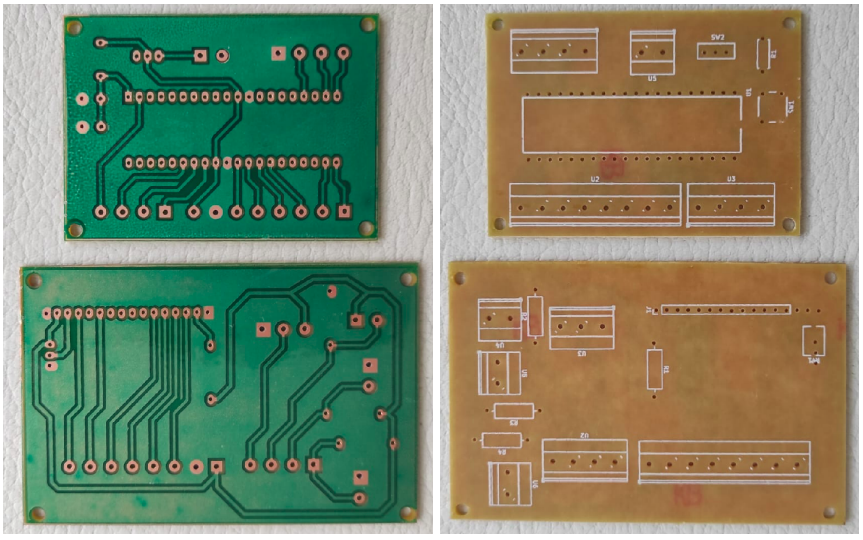



Figura 71: Distribución PCB 2

El resultado final son dos PCB las cuales son de una capa externa y ubicada en la parte inferior; en la parte superior están dispuestos los componentes electrónicos. La figura 72 muestra el resultado final obtenido.



(a) (b)

Figura 72: PCB impresas

# 9. Diseño del sistema eléctrico

## 9.1. Calibre de Cables

El cálculo del calibre es fundamental para garantizar una alimentación eficiente y segura, evitando pérdidas de energía y sobrecalentamientos que podrían comprometer el rendimiento y la vida útil del sistema.

### 9.1.1. Consideraciones Iniciales

Para calcular el calibre de los cables, es necesario tener en cuenta varios factores que afectan la corriente eléctrica y la caída de voltaje en el sistema. A continuación, se presentan las consideraciones más relevantes:

1. **Corriente de carga**: Se debe determinar la corriente máxima que será demandada por la máquina durante su funcionamiento normal. Esta corriente de carga se utiliza como base para el cálculo del calibre de los cables. Para el caso del sistema de control, se designa una corriente nominal de $2\,A$ la cual es la misma corriente capaz de de ser suministrada por el conversor DC DC implementado de 24V a 5V. Para el caso del motor, teniendo en cuenta la implementación del sistema de potencia y la corriente producida en el motor, se supone una corriente nominal máxima del motor de $6A$, asumiendo un factor de corrección de 2, teniendo en cuenta posibles sobrecorrientes del motor. Por último, y más importante, la corriente nominal máxima de la fuente de voltaje es de $15A$, esta se define debido a las especificaciones técnicas de la fuente adquirida, la cual es capaz de proveer una corriente mayor a la suma del sistema de control y de potencia sumadas.

2. **Distancia de cableado**: La longitud total de los cables desde la fuente de alimentación hasta la máquina es un factor crítico, ya que las pérdidas de voltaje aumentan con la distancia. Es importante medir o estimar con precisión esta distancia para incluirla en el cálculo.

3. **Material y resistividad del cable**: La resistividad del material del cable utilizado afecta la caída de voltaje y, por lo tanto, la elección del calibre. Los cables de cobre son comúnmente

utilizados debido a su baja resistividad, aunque también existen opciones de aluminio.

4. **Caída de voltaje permitida**: La cantidad máxima de caída de voltaje permitida en el sistema debe ser especificada. Una caída excesiva puede afectar el rendimiento de la máquina y provocar problemas en otros componentes eléctricos. Generalmente, se recomienda una caída de voltaje inferior al 5 % para sistemas de baja tensión.
5. **Factor de seguridad**: Para garantizar un funcionamiento confiable y seguro, se suele aplicar un factor de seguridad al calibre calculado. Este factor considera posibles fluctuaciones en la corriente de carga y proporciona un margen adicional para evitar el sobrecalentamiento de los cables.

### 9.1.2. Anális teórico

Para determinar el calibre adecuado de los cables, en este caso de la fuente de alimentación, se empleará la fórmula de caída de voltaje y se realizarán los siguientes pasos:

1. **Determinación de la corriente de carga** ($I_c$): A partir de las especificaciones de la máquina de corte de bananos y considerando su consumo máximo, se obtiene el valor de la corriente de carga requerida.
2. **Cálculo de la longitud total de los cables** ($L$): Midiendo o estimando la distancia desde la fuente de alimentación hasta la máquina, se obtiene el valor de la longitud total de los cables.
3. **Selección del material y resistividad del cable**: Considerando las propiedades eléctricas y los requerimientos del proyecto, se selecciona el material del cable, generalmente cobre o aluminio, y se obtiene el valor de la resistividad ($\rho$).
4. **Cálculo de la caída de voltaje máxima permitida** ($\Delta V$): Estableciendo el límite máximo de caída de voltaje permitida en el sistema, se obtiene su valor.
5. **Cálculo del diámetro mínimo del cable** ($d$): Aplicando la fórmula de caída de voltaje, se determina el diámetro mínimo del cable necesario para cumplir con las especificaciones. La fórmula utilizada es:

$$d = \sqrt{\frac{\rho L I_c}{K \Delta V}} \tag{20}$$

Donde:

- $d$ es el diámetro del cable.
- $\rho$ es la resistividad del material del cable.
- $L$ es la longitud total de los cables.
- $I_c$ es la corriente de carga requerida.
- $K$ es una constante que depende del sistema de unidades utilizadas. Para el sistema métrico, $K$ es generalmente 10.75.
- $\Delta V$ es la caída de voltaje máxima permitida.

Es importante tener en cuenta que la fórmula proporciona el diámetro del cable, por lo que es necesario seleccionar el calibre correspondiente a partir de tablas normalizadas que relacionen el diámetro con el calibre AWG.

6. **Aplicación del factor de seguridad**: Para agregar un margen adicional, se puede aplicar un factor de seguridad al diámetro del cable calculado. Este factor suele ser de alrededor del 10 % al 20 %, dependiendo de las especificaciones y requisitos del proyecto.

### 9.1.3. Cálculo Realizado

En este caso, teniendo en cuenta las consideraciones hechas en la sección anterior, el cálculo del calibre de los cables a utilizar se hace mediante la siguiente expresión obtenida del manual técnico [12].

$$I = fN \times fT \times It \tag{21}$$

Donde

- I : Corriente admisible corregida (A)
- fN: Factor de corrección por N0 de conductores.
- fT: Factor de corrección por temperatura.
- It : Corriente admisible por sección de conductor según tablas (A).

Los factores de corrección para este caso corresponden a los mostrados a continuación:

Cuadro 6: Factores de corrección utilizados

| **Parámetros** | **Valor** |
|---|---|
| I [A] | 15 |
| fN | 0.8 |
| fT | 1 |

A partir de esto se obtiene una corriente corregida $It = 18,75A$. Con este valor se busca en la tabla mostrada en la figura 73 el calibre adecuado para esta corriente.

| TEMPERATURA DE SERVICIO: 70ºC/TEMPERATURA AMBIENTE: 30ºC | | | |
|---|---|---|---|
| SECCION NOMINAL (mm)$^2$ | GRUPO1 | GRUPO2 | GRUPO3 |
| 0.75 | - | 12 | 15 |
| 1 | 11 | 15 | 19 |
| 1.5 | 15 | 19 | 23 |
| 2.5 | 20 | 25 | 32 |
| 4 | 25 | 34 | 42 |
| 6 | 33 | 44 | 54 |
| 10 | 45 | 61 | 73 |
| 16 | 61 | 82 | 98 |
| 25 | 83 | 108 | 129 |
| 35 | 103 | 134 | 158 |
| 50 | 132 | 167 | 197 |
| 70 | 164 | 207 | 244 |
| 95 | 197 | 249 | 291 |
| 120 | 235 | 291 | 343 |
| 150 | - | 327 | 382 |
| 185 | - | 374 | 436 |
| 240 | - | 442 | 516 |
| 300 | - | 510 | 595 |
| 400 | - | - | 708 |
| 500 | - | - | 809 |

GRUPO 1: Monoconductores tendidos al interior de ductos.
GRUPO 2: Multiconductores con cubierta común, que van al interior de tubos metálicos, cables planos, cables portátiles o móviles, etc.
GRUPO 3: Monoductores tendidos sobre aisladores.

Figura 73: Tabla de calibres a partir de la corriente máxima

El calibre que se selecciona finalmente corresponde a **12 AWG**.

### 9.1.4. Calibres sistema de control

Al realizar el mismo desarrollo para los cables puntualmente del sistema de control, con una corriente nominal de $2A$, se tiene que, teniendo un factor de corrección $fN = 0{,}7$ (entre 7 a 24 conectores), se obtiene una $It = 2{,}85$, seleccionando un calibre de cables AWG22 que permite hasta $3A$.

### 9.1.5. Calibres sistema de potencia

Al realizar el mismo desarrollo para los cables puntualmente del sistema de control, con una corriente nominal de $6A$, se tiene que, teniendo un factor de corrección $fN = 0{,}7$ (entre 7 a 24 conectores), se obtiene una $It = 8{,}57A$, seleccionando un calibre de cables AWG16 que permite hasta $10A$.

## 9.2. Diseño de tablero de control

En el proceso de diseño de una caja de control para una máquina, se deben tener en cuenta diversas consideraciones importantes. El objetivo es proporcionar un entorno seguro y funcional para los componentes electrónicos, como la fuente de alimentación, el convertidor DC-DC, el puente H y la PCB. A continuación, se detallan las consideraciones clave para este proceso, considerando que la caja tendrá dimensiones de 30x30x20 cm:

1. **Dimensiones y espacio interno:** Se debe asegurar que la caja sea lo suficientemente grande para acomodar los componentes mencionados, así como proporcionar espacio adicional para la gestión de cables y una adecuada circulación de aire.

2. **Material de la caja:** Seleccionar un material apropiado que ofrezca protección contra los elementos externos, la humedad y el polvo. Los materiales comunes utilizados en las cajas de

control son el acero inoxidable, el aluminio y el plástico, los cuales deben ser evaluados considerando la resistencia mecánica y la disipación de calor.

3. **Ventilación y disipación de calor:** Diseñar la caja con orificios de ventilación adecuados y considerar la instalación de ventiladores si es necesario. Es fundamental asegurar un flujo de aire suficiente para evitar el sobrecalentamiento de los componentes.

4. **Protección eléctrica:** La caja debe brindar protección contra descargas eléctricas y cortocircuitos. Se deben utilizar materiales aislantes en el revestimiento interno de la caja y asegurar una correcta conexión y aislamiento de los componentes.

5. **Acceso y mantenimiento:** Diseñar la caja de manera que permita un fácil acceso a los componentes para su mantenimiento y reparación. Se puede considerar el uso de paneles desmontables o puertas que no comprometan la integridad de la caja.

6. **Organización y fijación:** Planificar la ubicación de los componentes dentro de la caja y asegurarlos de manera adecuada para evitar vibraciones y movimientos no deseados. Se deben utilizar sistemas de montaje apropiados, como rieles, soportes o bridas.

7. **Etiquetado y cableado:** Etiquetar claramente los componentes y los cables dentro de la caja para facilitar la identificación y el mantenimiento. Se deben organizar los cables de manera ordenada utilizando abrazaderas o canaletas para evitar enredos.

8. **Normativas y estándares:** Cumplir con las normativas y estándares aplicables a la caja de control y los componentes que contiene. Esto incluye consideraciones de seguridad, compatibilidad electromagnética (EMC) y requisitos de certificación, si corresponde.

9. **Pruebas y validación:** Realizar pruebas y validaciones antes de implementar la caja de control en la máquina para asegurarse de que los componentes funcionen correctamente y que la caja cumpla con los requisitos de rendimiento y seguridad establecidos.

La caja seleccionada es la siguiente:

Figura 74: Caja de paso seleccionada [13]

## 9.3. Diseño de Human Machine Interface (HMI)

El diseño del *human interface* se tienen en cuenta las siguiente consideraciones.

**Funcionalidad y usabilidad:** La interfaz debe ser intuitiva y fácil de usar. Los pulsadores deben estar ubicados de manera lógica y accesible para que el operario pueda controlar la máquina sin dificultad. El display debe mostrar la información relevante de manera clara y legible.

**Diseño ergonómico:** Es esencial considerar la comodidad y seguridad del operario al interactuar con la interfaz. Los pulsadores deben estar dimensionados adecuadamente para facilitar su accionamiento sin esfuerzo excesivo. Además, se debe tener en cuenta la posición y ángulo de visión del display para evitar fatiga visual o postural.

**Retroalimentación y respuesta táctil:** Es recomendable incluir retroalimentación visual o auditiva al interactuar con los pulsadores para indicar al operario que se ha registrado la acción. Esto puede lograrse mediante el uso de luces indicadoras o sonidos. Además, proporcionar una respuesta táctil clara y consistente al presionar los pulsadores mejora la experiencia del usuario.

**Etiquetado y símbolos:** Es fundamental etiquetar correctamente los pulsadores y el display para indicar claramente su función. Utilizar símbolos gráficos universales o íconos reconocibles puede facilitar la comprensión y uso por parte del operario, incluso si no está familiarizado con el idioma utilizado.

**Iluminación y contraste:** La interfaz debe ser visible en diferentes condiciones de iluminación. Considerar la incorporación de retroiluminación en el display y los pulsadores para mejorar la legibilidad. Además, asegurarse de que exista un contraste adecuado entre los caracteres y el fondo para una fácil lectura.

**Resistencia y durabilidad:** La interfaz debe ser resistente y capaz de soportar las condiciones de trabajo. Utilizar materiales y componentes duraderos que sean capaces de resistir golpes, vibraciones y condiciones ambientales adversas.

**Cumplimiento de normativas:** Asegurarse de que la interfaz cumpla con las normativas y estándares aplicables en términos de seguridad, accesibilidad y calidad. Esto incluye consideraciones como la prevención de riesgos eléctricos, protección contra interferencias electromagnéticas y cumplimiento de estándares de seguridad específicos de la industria.

**Pruebas y validación:** Antes de implementar la interfaz en la máquina, realizar pruebas exhaustivas para garantizar su correcto funcionamiento, usabilidad y cumplimiento de los requisitos establecidos. Esto puede incluir pruebas de usabilidad con operarios reales y evaluaciones de ergonomía.

El resultado final se muestra a continuación:

Figura 75: Diseño final *human interface*

## 9.4. Lista de Componentes

### 9.4.1. Tablero de control

1. Caja de paso
2. Placa de montaje
3. Espaciadores para montaje
4. PCB 1
5. Conversor DC DC Lm2596
6. Puente H BTS7960
7. Fuente de alimentación
8. Canaletas
9. Cable calibre 12 y 22 AWS

### 9.4.2. Human Machine Interface (HMI)

1. Carcasa botones
2. Porta fusible
3. Pulsadores
4. PCB 2
5. Display 20x4
6. Perilla
7. Cable calibre 12 y 22 AWS

# 10. Diseño Estructural

El material usado para la parte estructural de la maquina fue A36, las propiedades este relacionadas a los calculos aqui presentados son:

Cuadro 7: Propiedades de Acero Estructural A36

| Acero Estructural A36 | |
|---|---|
| Densidad $[kg/m^3]$ | 7800 |
| Limite de fluencia [MPa] | 250 |
| Modulo de Elasticidad [GPa] | 200 |
| Coeficiente de Poisson | 0.26 |

## 10.1. Estructura soporte Motor

### 10.1.1. Análisis estructura

- **Reacciones Motor-Estructura**

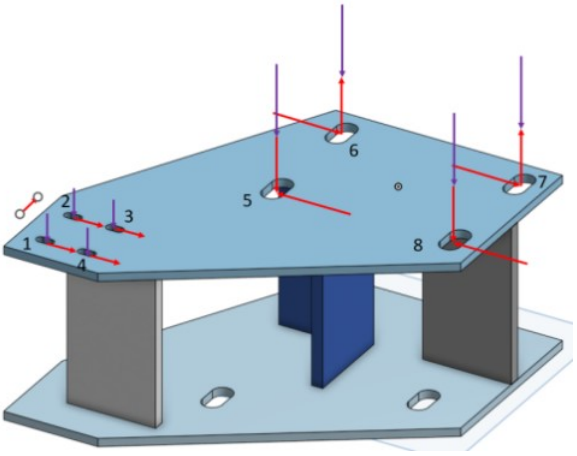



Figura 76: Diagrama cuerpo Libre Estructura de soporte motor

Cuadro 8: Descomposición de Reacciones en ejes ANSYS [Newtons]

| Posición | Z | Y | X |
|---|---|---|---|
| **1** | -11,74 | -1,11 | 19,37 |
| **2** | 30,07 | -1,11 | 22,44 |
| **3** | 33,14 | -1,11 | -19,37 |
| **4** | -8,67 | -1,11 | -22,44 |
| **5** | -41 | -7,08 | 0 |
| **6** | 23,35 | -3,88 | 0 |
| **7** | 23,35 | -3,88 | 0 |
| **8** | -41 | -7,08 | 0 |

- **Reacciones Estructura motor - Mesa**

  Una vez se obtuvieron las reacciones en la estructura que soporta el motor producto del proceso de corte se procede a realizar el análisis estructural de esta pieza pues se debe garantizar una deflexión mínima para no comprometer el buen funcionamiento de la transmisión flexible y por ende la calidad del corte.

Para estos cálculos se hizo uso del software ANSYS 2022 R2 y el modulo structural específicamente, puesto que piezas como la placa donde es soportado el motor y las chumaceras tienen formas de las cuales no se tiene documentación extensa para realizar cálculos manuales, por esto el mejor método de solución en este caso es el de elementos finitos.

- **Pre-Procesamiento:**

  Para no presentar errores numéricos por la malla se realiza un algoritmo de enmallado de tal manera que se garantice una medida de skewness (oblicuidad) menor a 0.75 como es recomendado.

  El algoritmo crea las divisiones necesarias para hacer que todos los elementos sean hexaedricos y en el caso de los perfiles en L se logra que la malla sea totalmente estructurada.

  1. **Malla**

Figura 77: Algoritmo de enmallado empleado

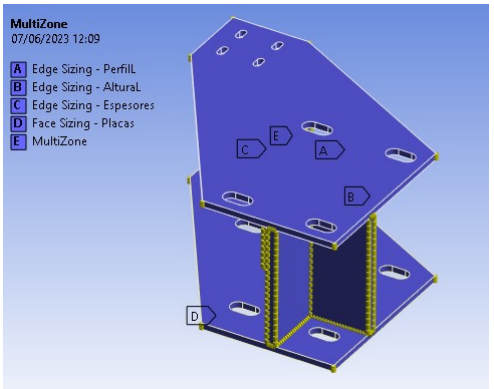


Figura 78: Superficies de algoritmo

Los resultados del algoritmo de enmallado se pueden observar en las Figuras 79 y 80, el objetivo del algoritmo se cumplio pues todos los elementos son hexaedros.

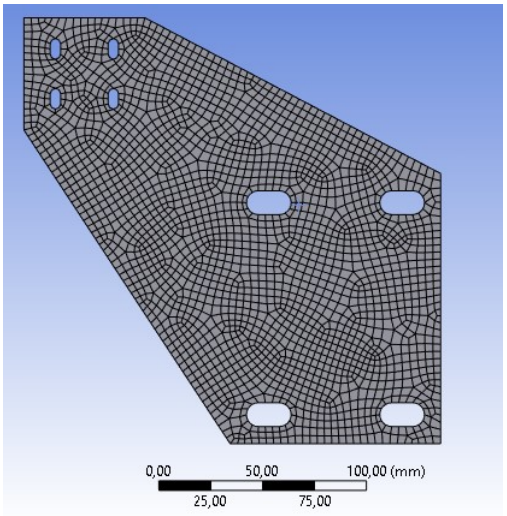


Figura 79: Malla sobre placas horizontales

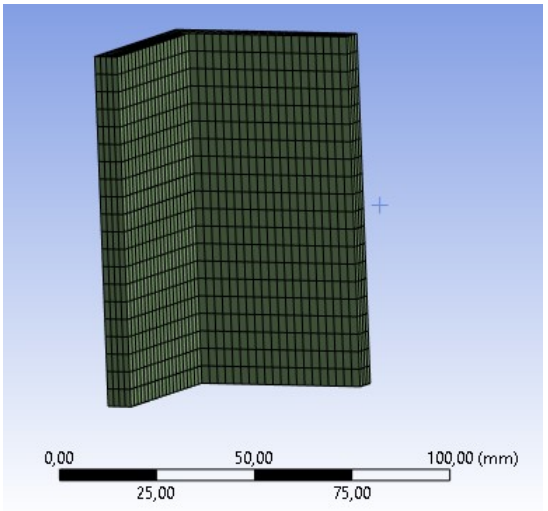


Figura 80: Malla perfiles en L

Para garantizar la calidad de la malla se obtienen los datos de skewness directamente del software y se comparan con las métricas de la tabla 9.

Cuadro 9: Calidad de la celda segun su valor de skewness

| Valor del Skeweness | Calidad de la celda |
|---|---|
| 1 | Degenerada |
| 0.9 - 1 | Mala |
| 0.75 - 0.9 | Pobre |
| 0.5 - 0.75 | Justa |
| 0.25 - 0.5 | Buena |
| 0 - 0.25 | Excelente |
| 0 | Equilateral |

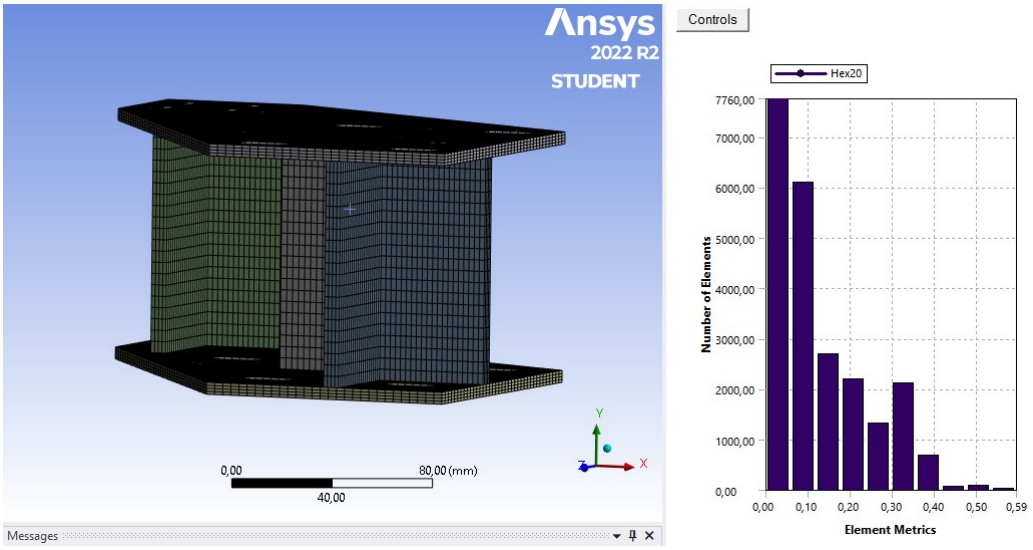



Figura 81: Métrica Skewness Malla

La mayor parte de los elementos se encuentran dentro de una calidad excelente y buena, muy pocos dentro de la calidad justa y ninguno con mala calidad por esto se procede a continuar con las simulaciones. La media del skewness en la totalidad de la malla es de 0.13 lo cual nos indica que no habrá difusión de error debido a la calidad de la malla.

Cuadro 10: Métricas de la Malla creada

| Estadísticas malla | |
|---|---|
| **Elementos** | 22.952 |
| **Nodos** | 118.075 |
| **Skewness** | |
| **Max** | 0,59 |
| **Min** | $1{,}6\times10^{-5}$ |
| **Promedio** | 0,13 |

2. **Condiciones de Frontera**

Se deben seleccionar de manera correcta las condiciones de frontera del modelo de estructura, por un lado tenemos las fuerzas resultados de la interacción motor y chumaceras con la estructura y por otro tenemos las reacciones de esta estructura de soporte con las mesa de la maquina, las fuerzas hechas por el motor y las chumaceras a la estructura se encuentran tabuladas en la Tabla 8. Por otro lado se hará uso del

modulo structural para calcular las fuerzas de la mesa a la estructura, para esto se establece una condición de Fixed support a las 4 ranuras que conectan la estructura con la mesa esto se debe a que las 4 seran sujeciones por perno y tuerca.

El posicionamiento y nombramiento de las Fuerzas corresponde al hecho en la Figura 76.

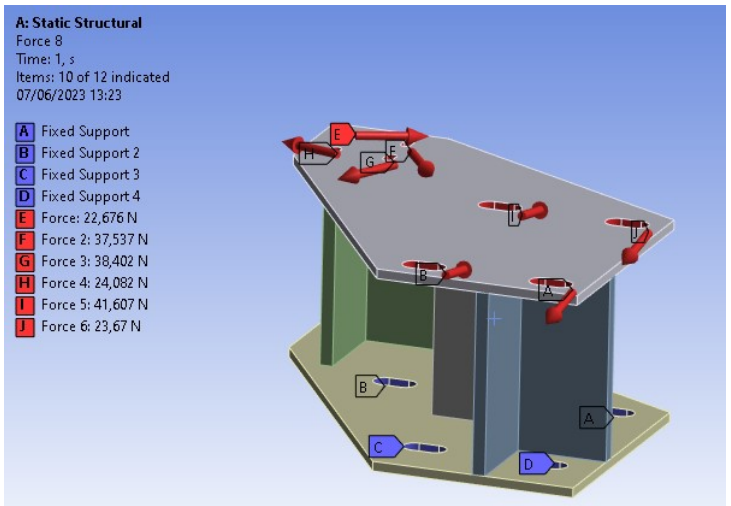



Figura 82: Notación

- **Resultados:**

Para reportar los resultados se maneja la nomenclatura mostrada en la Figura 83.

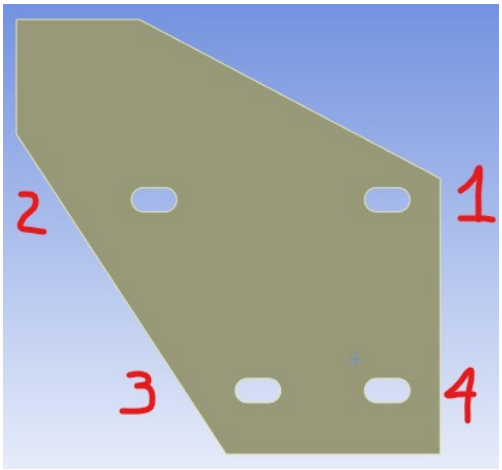



Figura 83: Numeración soporte mesa

Se observa unas reacciones del mismo orden de magnitud más la aparición de momentos en las ranuras pernadas tabuladas en la Tabla 11.

Cuadro 11: Reacciones Estructura motor - Mesa

| | **Fx (N)** | **Mx (Nm)** | **Fy (N)** | **My (Nm)** | **Fz (N)** | **Mz (Nm)** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Soporte 1** | -4,1 | -0,011 | 3 | -0,02 | -6,1 | -0,09 |
| **Soporte 2** | -1,9 | 0,13 | 5,5 | 0,07 | 4,1 | 0,15 |
| **Soporte 3** | 4,9 | 0,009 | 10,5 | 0,007 | -1,6 | 0,16 |
| **Soporte 4** | 1,2 | -0,18 | 7,4 | -0,025 | -3,9 | -0,38 |

Debido a la aparición de momentos flectores y torsores se decide mostrar los resultados del esfuerzo equivalente de Von Mises que son datos más representativos.

El mínimo factor de seguridad basandose, en las propiedades mecánicas del A36 tabuladas en la tabla 7, para esta estructura es:

$$FS = \frac{250}{2,4} = 104$$

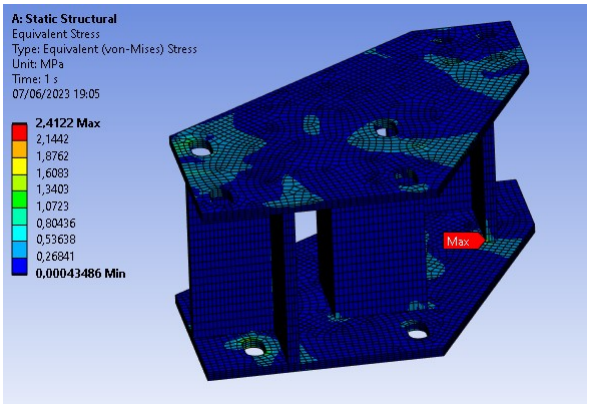



Figura 84: Esfuerzo equivalente de Von Mises Estructura motor

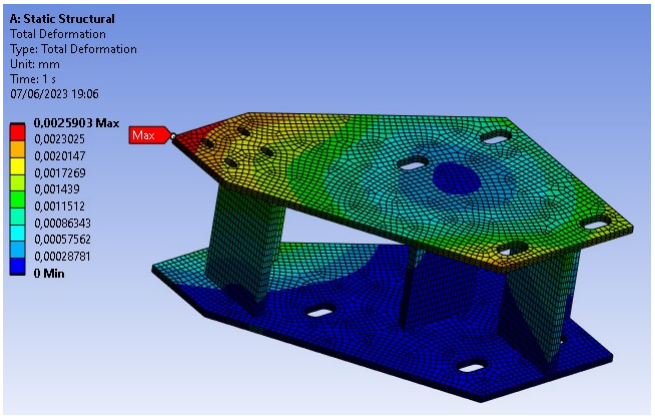



Figura 85: Dedormaciones Estructura motor

Por parte de las deformaciones se observa que las maximas son de $2,5 \times 10^{-3} mm$ las cuales estan dentro del margen permitido para no afectar el montaje del eje y sistema de transmisión flexible y son máximas cercanas al motor, ya cercanas a las chumaceras son aun menores que esta cantidad.

## 10.2. Estructura Mesa

### 10.2.1. Pre-proceso:

Debido a la cantidad de perfiles y a los dos tipos de perfiles que se tienen cuadrados y en L se decidió hacer los cálculos estructurales de la mesa en el entorno de frame analysis de Inventor ya que en ANSYS debido al tamaño de la mesa el obtener resultados óptimos hubiese llevado a tener que trabajar al limite o incluso superar el limite de elementos permitidos por la licencia estudiantil de este software.

Dado que se tienen las fuerzas que hace la mesa sobre la estructura de soporte del motor por tercera ley de newton tenemos también las fuerzas que hace la estructura sobre la mesa las cuales servirán como parte de las condiciones de frontera para los cálculos estructurales. Se inicia desplazando las fuerzas a los nodos B y C puesto que el entorno de Frame Analysis solo permite ubicar fuerzas en nodos o como cargas distribuidas.

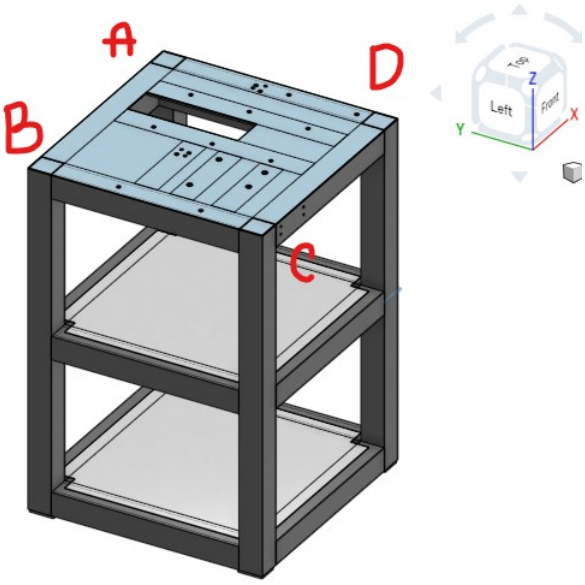



Figura 86: Notación nodos mesa

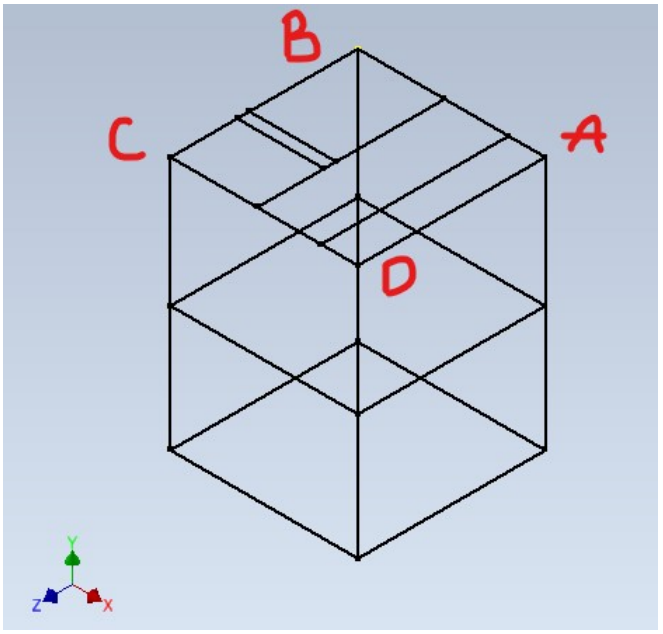



Figura 87: Estructura en Inventor

La Tabla 12 tiene las distancias para realizar la traslación de las fuerzas, como es sabido esto provocara la aparición de momentos para mantener la equivalencia entre el sistema original y el de las fuerzas desplazadas, los resultados y por ende las condiciones de carga de estos nodos usadas para la simulación se observan en la tabla 13.

Cuadro 12: Distancias para traslación de Fuerzas

| **Distancias con ejes de referencia OnShape** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **C-3** | **C-4** | **B-1** | **B-2** |
| **X (m)** | 0,143 | 0,204 | 0,204 | 0,094 |
| **Y (m)** | 0,11 | 0,11 | 0,3 | 0,3 |

Cuadro 13: Fuerzas y Momentos para simulación estructural

| **Fuerzas y momentos sobre Nodos B y C Inventor** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Fx (N)** | **Mx (Nm)** | **Fy (N)** | **My (Nm)** | **Fz (N)** | **Mz (Nm)** |
| **B** | 6 | 2,43 | -8,5 | 0,12 | 2 | -1,19 |
| **C** | -6,1 | 0,51 | -17,9 | -1,68 | 5,5 | -2,79 |

Con las fuerzas desplazadas se procede a calcular los pesos soportados por la mesa del conjunto del sistema de corte (Estructura, motor, transmisión flexible y eje), del subsistema de transporte (Cajón) y del subsistema de control (Caja). Para esto se hizo uso de la herramienta de medición de volumen de OnShape y se calculo el peso por medio de la densidad de cada material.

Cuadro 14: Peso Aproximado Sub-sistemas maquina

| | **Volumen [m3]** | **Densidad Material [kg/m3]** | **Masa [kg]** | **Peso [N]** |
|---|---|---|---|---|
| **Sis Corte** | 0,0009 | 7800 | 7,02 | 68,8662 |
| **Transporte** | 0,002 | 8000 | 16 | 156,96 |
| **Control** | 0,0013 | 8000 | 10,4 | 102,024 |

Para calcular la fuerza producida a la mesa por la carga de bananos se calcula el peso de una carga completa de estos.

Cuadro 15: Peso Carga de Bananos

| | **Cantidad** | **Masa [kg]** | **Peso [N]** |
|---|---|---|---|
| **Carga de Bananos** | 200 | 0,0945 | 185,409 |

Por ultimo se tiene en cuenta la cantidad de vigas que soportan estos pesos y se crea una carga distribuida con la longitud de estas, todas estas cargas se amplifican en un orden de 3 para estimar un caso critico donde la mesa es ocupada por otros objetos.

Cuadro 16: Carga en cada viga para simulación

| **Simulación Estructutal Inventor** | | |
|---|---|---|
| | **Vigas** | **Carga x Viga [N/m]** |
| **Sis Corte** | 2 | 437,709 |
| **Transporte** | 2 | 461,647 |
| **Control** | 2 | 300,071 |
| **Carga de Bananos** | 4 | 272,660 |

La totalidad de Fuerzas, momentos y cargas distribuidas se ubican según corresponda en los nodos o vigas como se observa en la Figura 88.

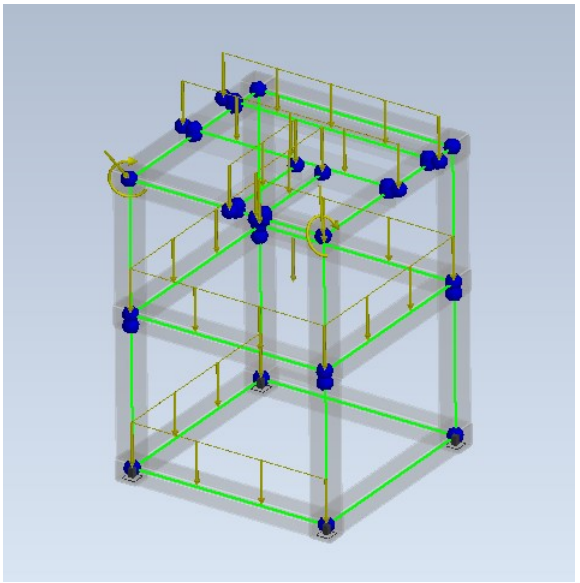


Figura 88: Condiciones de Frontera para simulación Inventor

### 10.2.2. Resultados:

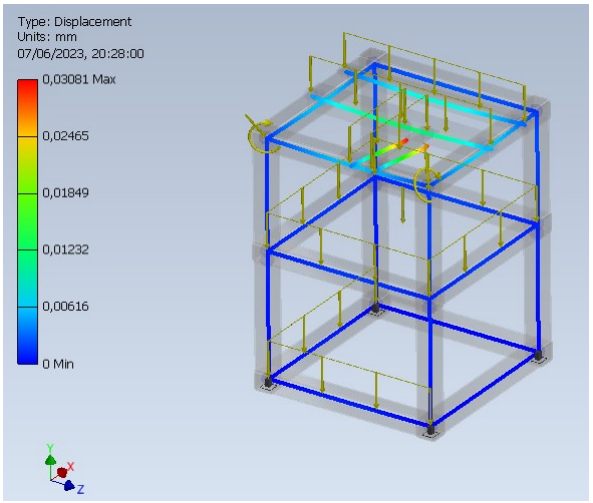



Figura 89: Deformaciones calculadas para la mesa

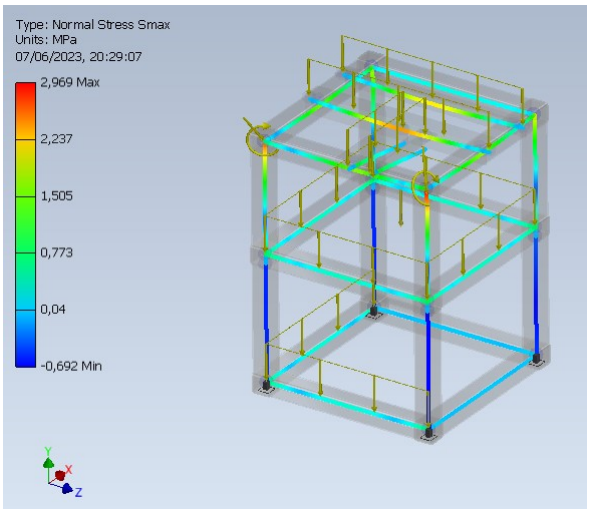



Figura 90: Esfuerzo Equivalente perfiles mesa

Las máximas deformaciones obtenidas fueron de $0{,}03mm$ en el perfil que sostiene a la estructura del motor y conecta con el perfil que sostiene el cajón de transporte, los resultados muestran una deflexión muy baja incluso para una situación extrema de sobrecarga como la que se simulo.

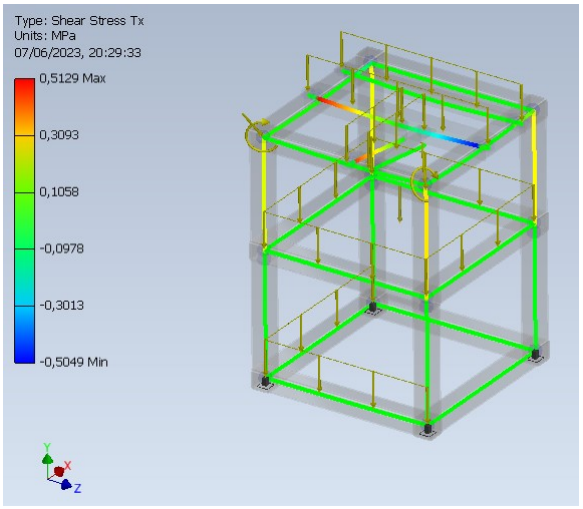



Figura 91: Esfuerzo Cortante Mesa componente

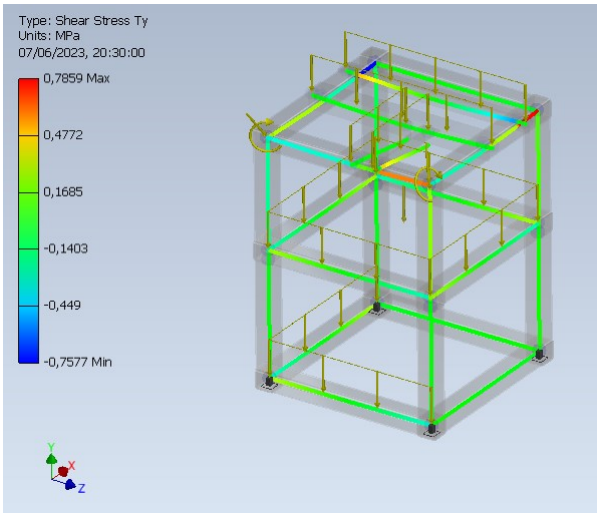



Figura 92: Esfuerzo cortantes mesa componente

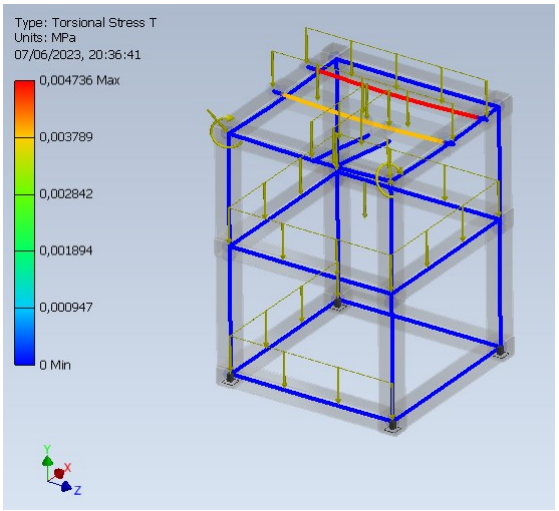



Figura 93: Esfuerzo Torsional perfiles mesa

Del análisis de esfuerzos se observa que los máximos serán de 3 MPa correspondientes al esfuerzo equivalente de Von Mises en el nodo C sin embargo equivale nuevamente a un factor de seguridad de $FS = 83$ por lo cual se determina que el diseño de la mesa es el correcto.

# 11. Diseño de Uniones

## 11.1. Uniones atornilladas del sistema de transporte

Para el sistema de transporte se requieren dos tipos de uniones. Inicialmente, 6 uniones atornilladas que permiten la unión entre el sistema y la mesa de operación.

El diseño y selección de estos tornillos se realizó siguiendo la metodología sugerida en el Standard Handbook of Machine Desing de Joseph Sigley (resumida a manera de algoritmo visual al final de esta sección). El paso inicial es conocer las dimensiones generales del perno y las características del material a usar. Para este caso se partió de un perno de diámetro 1/4 in, por facilidad de compra y un grado SAE 2, que especifica un acero de bajo o medio carbono. Adicionalmente, se establece la carga a la cual estarán sometidos estos tornillos, que en su totalidad será a tensión provocada por el peso del cajón cuando este está en la posición de ubicación inicial del banano. En seguida se muestra una simplificación del sistema, el cual determina la fuerza externa de tensión a la cual estarán sometidos los tornillos, y el cálculo que se tomara como critico será con los tornillos que estén sometidos a la mayor tensión.

Cuadro 17: Parámetros iniciales para el cálculo en transporte

| **Parámetro** | **Valor** |
|---|---|
| Diámetro nominal del perno [in] | 1/4 |
| Longitud de agarre, Lg [in] | 0.465 |
| Longitud del perno, L [in] | $> 0{,}62 \approx 1$ |
| Longitud Roscada, Ls [in] | 0.75 |
| Longitud Sin Rosca, Lb [in] | 0.25 |
| Módulo Elástico, E [psi] | 26500000 |
| Fuerza externa a tensión [lbf] | 17.395 |
| Hilos por Pulgada, n [1/in] | 20 |
| Mínima Resistencia Última, Su [psi] | 74000 |
| Resistencia Fluencia Perno, Syb [psi] | 57000 |
| Scatter de Precarga, Ps | 0.5 |
| Porcentaje de Pérdida, Pz | 0.1 |
| Factor de Tuerca, K | 0.2 |

Una vez se tienen estos datos de entrada se procede a hacer el cálculo de las áreas del perno y de tensión roscada para así determinar la rigidez de la junta y del sujetador. Obteniendo los siguientes resultados

Cuadro 18: Parámetros iniciales para el cálculo en transporte

| **Parámetro** | **Valor** |
|---|---|
| Área del Cuerpo, Ab $[in^2]$ | 0.05 |
| Área a Tensión Roscada, As $[in^2]$ | 0.03 |
| Rigidez del Sujetador, kb [lb/in] | 2236377,508 |
| Rigidez de la Junta, kj [lb/in] | 4019089,864 |

Ya que estos tornillos no están sometidos a cortante u torsión solo hace falta establecer la Fuerza de Tensión Admisible, $F_t$ Max [lb] que esta determinada por $S_{YB} * A_s$, y es igual a 1813,792329 lb. Con esto indicado se determina la fuerza de sujeción mínima aceptable en una junta $F_{cmin}$ determinada

por $\frac{Fx}{\mu_s}$ en donde $\mu_s$ es el coeficiente de deslizamiento de una junta de fricción que para pernos de acero medio al carbono será 0.2, dando como resultado $F_{cmin} = 86{,}975\, lbf$.

Con esta fuerza se determina la precarga objetivo, la precarga máxima, la tensión máxima anticipada,la fuerza de unión mínima anticipada y el torque requerido para lograr la precarga establecida. Las ecuaciones utilizadas para calcular estos factores son mostradas en el anexo memoria de cálculos.

Cuadro 19: Parámetros iniciales para el cálculo en transporte

| **Parámetro** | **Valor** |
|---|---|
| Precarga Mínima, Fc min [lb] | 86.975 |
| Precarga Objetivo, Fpt [lb] | 1123.065 |
| Precarga Máxima, Fp max [lb] | 1684.598 |
| Tensión Máxima Anticipada, Fb max [lb] | 1695.774 |
| Fuerza de Unión Mínima Anticipada, Fj min [lb] | 460.402 |
| Torque, T [lb-in] | 56.153 |

Los parámetros que determinan que la unión atornillada es la indicada para la fuerza externa que se tiene, son, si $F_{B_{max}} < F_{T_{max}}$ y si $F_{J_{min}} < F_{c_{min}}$, ya que en este caso se cumple, se puede asegurar que la selección de tornillos es la adecuada, por ende se hará uso de tornillos de 1/4 in de diámetro nominal, de 1 in de longitud y grado SAE 2.

El otro tipo de unión requerida en el sistema de transporte es la unión entre las platinas que soportan el banano y las platinas que van sujetadas a las correderas. Ya que estas uniones no están sometidas a ningún tipo de fuerzas y solo tienen el objetivo de mantener la unión entre las platinas, entonces se determina únicamente la longitud requerida del perno.

Cabe aclarar que la selección de tornillos para esta unión se dio por la necesidad de ensamble y desensamble de este sistema, por ellos no se optaron otro tipo de uniones fijas como, remaches o soldadura. En este caso se tienen los siguientes datos

Cuadro 20: Parámetros iniciales para el cálculo en transporte

| **Parámetro** | **Valor** |
|---|---|
| Diámetro nominal del perno [in] | 1/4 |
| Longitud de agarre, Lg [in] | 0.24 |
| Longitud del perno, L [in] | $> 0{,}39 \approx$ 1/2 |
| Longitud Roscada, Ls [in] | 0.75=todo el cuerpo del perno |
| Longitud Sin Rosca, Lb [in] | 0 |
| Hilos por Pulgada, n [1/in] | 20 |

Con estos datos se seleccionan tornillos de 1/4 in, de diámetro nominal de 1/2 in de longitud y grado SAE 2.

## 11.2. Uniones atornilladas del sistema de corte

En el sistema de corte se harán necesarias más uniones atornilladas. Inicialmente se cuenta con los tornillos que sujetan las chumaceras a la estructura del sistema de corte, las cuales ya que están determinadas por las dimensiones de las de las ranuras y por el fabricante, que asegura la sujeción debido a las cargas a las cuales somete una chumacera a su apoyo,y por lo cual no se realiza el calculo como el realizado anteriormente. En segunda instancia se tienen los tornillos utilizados para

la estructura del motor que aunque vengan definidos en dimensión por la base del motor, se realizará la confirmación de esta unión, realizando el procedimiento de la sección anterior, teniendo en cuenta que estos tornillos estarán sometidos a cargas de cortante y de torque.

Cuadro 21: Parámetros iniciales para el cálculo en Corte 1

| **Parámetro** | **Valor** |
|---|---|
| Diámetro nominal del perno [in] | 5/32 |
| Longitud de agarre, Lg [in] | 0.57 |
| Longitud del perno, L [in] | $> 0{,}73 \approx 1$ |
| Longitud Roscada, Ls [in] | 0.56 |
| Longitud Sin Rosca, Lb [in] | 0.17 |
| Hilos por Pulgada, n [1/in] | 20 |

Ya que se maneja el mismo grado del tornillo se tendrán las mismas características del material presentadas en el cuadro 14. Con estos datos presentados en la tabla anterior es posible determinar las áreas, del perno y de tensión roscada, así como la rigidez de la junta y del sujetador. Siguiendo las ecuaciones mostradas en la memoria de cálculos se obtienen los siguientes resultados

Cuadro 22: Parámetros iniciales para el cálculo en corte 1

| **Parámetro** | **Valor** |
|---|---|
| Área del Cuerpo, Ab $[in^2]$ | 0,019 |
| Área a Tensión Roscada, As $[in^2]$ | 0,0091 |
| Rigidez del Sujetador, kb [lb/in] | 495236,5302 |
| Rigidez de la Junta, kj [lb/in] | 1275739,106 |

Ya que estos tornillos estarán sometidos a cortante por la reacción generada por las poleas y la cuchilla, se debe establecer una nueva fuerza de tensión admisible dada por la relación entre el esfuerzo cortante en un perno que se determina a partir de las fuerzas de cortante y la resistencia última a la tracción del material, para determinar cada uno de estos valores es necesario conocer la configuración y el centroide de la unión de 4 pernos, para de esta manera desplazar las fuerzas que generan cortante y poder distribuirlas de igual forma. En este caso se trata de una geometría rectangular, por lo que es sencillo establecer la fuerza cortante de cada unión. Las ecuaciones y desarrollo están presentes en la memoria de cálculos dando como resultado los siguientes valores

Cuadro 23: Parámetros iniciales para el cálculo en Corte 1

| **Parámetro** | **Valor** |
|---|---|
| Número de pernos | 4 |
| Fuerza Cortante 1, F1 [lb] | -9,616441312 |
| Fuerza Cortante 2, F2 [lb] | 1,743401185 |
| Fuerza Cortante en la Junta, Fs [lb] | 7,873040 |
| Fuerza Primaria, Fb [lb] | 1,968260 |
| Momento de Carga, M [lb-in] | 13,199828 |
| Esfuerzo Cortante Máximo, Sr max [psi] | 108,958738 |
| Relación de Esfuerzos, $\lambda$ | 0,001472 |
| Resistencia a la Tensión Máxima, $\sigma_t$ max [psi] | 73999,78 |
| Fuerza de Tensión Admisible, Ft Max [lb] | 672,08 |
| Precarga Objetivo, Fpt [lb] | 362,9223648 |
| Precarga Máxima, Fp max [lb] | 544,3835472 |
| Tensión Máxima Anticipada, Fb max [lb] | 544,3835472 |
| Fuerza de Unión Mínima Anticipada, Fj min [lb] | 145,1689459 |
| Torque, T [lb-in] | 11,3413239 |

Los parámetros que determinan que la unión atornillada es la indicada para la fuerza externa que se tiene, son, si $F_{B_{max}} < F_{T_{max}}$ y si $F_{J_{min}} < F_{c_{min}}$, ya que en este caso se cumple, se puede asegurar que la selección de tornillos es la adecuada, por ende se hará uso de tornillos de 5/32 in de diámetro nominal, de 1 in de longitud y grado SAE 2, para facilidad de ensamble se utilizan tornillos de cabeza redonda, con arandela común y tuerca autobloqueante por presencia de vibraciones.

En tercera instancia se tendrán los tornillos que soportan la estructura del motor a la mesa de operación. Tomando como punto de partida la ranura que estará sometida a mayor tensión y fuerza cortante, que se determina en la sección 8.1.1, a partir del calculo de las reacciones hacia las fuerzas realizadas por todo el sistema de corte ilustrada en el cuadro 8. realizando la misma metodología del caso anterior y siguiendo los pasos establecidos en la memoria de cálculos se obtienen los siguientes resultados

Cuadro 24: Parámetros iniciales para el cálculo en Corte 2

| **Parámetro** | **Valor** |
|---|---|
| Diámetro nominal del perno [in] | 1/4 |
| Longitud de agarre, Lg [in] | 0.5275 |
| Longitud del perno, L [in] | $> 0{,}68 \approx 1$ |
| Longitud Roscada, Ls [in] | 0.75 |
| Longitud Sin Rosca, Lb [in] | 0.25 |
| Hilos por Pulgada, n [1/in] | 20 |

Cuadro 25: Parámetros iniciales para el cálculo en Corte 2

| **Parámetro** | **Valor** |
|---|---|
| Área del Cuerpo, Ab $[in^2]$ | 0,049 |
| Área a Tensión Roscada, As $[in^2]$ | 0,0032 |
| Rigidez del Sujetador, kb [lb/in] | 1918394,147 |
| Rigidez de la Junta, kj [lb/in] | 3653170,569 |

Cuadro 26: Parámetros iniciales para el cálculo en Corte 2

| **Parámetro** | **Valor** |
|---|---|
| Número de pernos | 1 |
| Fuerza Cortante 1, F1 [lb] | 1,1015641 |
| Fuerza Cortante 2, F2 [lb] | 0,3596944 |
| Fuerza Cortante en la Junta, Fs [lb] | 1,158803 |
| Fuerza Primaria, Fb [lb] | 1,158803 |
| Momento de Carga, M [lb-in] | 5,125247 |
| Esfuerzo Cortante Máximo, Sr max [psi] | 24,808054 |
| Relación de Esfuerzos, $\lambda$ | 0,000335 |
| Resistencia a la Tensión Máxima, $\sigma_t$ max [psi] | 73999,99 |
| Fuerza de Tensión Admisible, Ft Max [lb] | 2354,75 |
| Fuerza externa de la junta, Fx [lb] | 2,3605 |
| Precarga Minima, Fc min [lb] | 11,80247 |
| Precarga Objetivo, Fpt [lb] | 1276,284675 |
| Precarga Máxima, Fp max [lb] | 1914,427013 |
| Tensión Máxima Anticipada, Fb max [lb] | 1915,974745 |
| Fuerza de Unión Mínima Anticipada, Fj min [lb] | 512,0616013 |
| Torque, T [lb-in] | 63,81423376 |

Los parámetros que determinan que la unión atornillada es la indicada para la fuerza externa que se tiene, son, si $F_{B_{max}} < F_{T_{max}}$ y si $F_{J_{min}} < F_{c_{min}}$, ya que en este caso se cumple, se puede asegurar que la selección de tornillos es la adecuada, por ende se hará uso de tornillos de 1/4 in de diámetro nominal, de 1 in de longitud y grado SAE 2.

## 11.3. Uniones soldadas de estructuras

El siguiente tipo de unión necesaria para el prototipo es la unión soldada para las estructuras presentes. Todas estas se analizan siguiendo la guía de diseño de Norton, en esta se usa el modelo de considerar la soldadura como una linea. En este caso en lugar de esfuerzo, este cálculo nos brinda un número de carga/longitud (lb/in o N/m), el cual se convierte fácilmente al área de la sección transversal requerida de la soldadura, con el esfuerzo permisible de la soldadura para cargas estáticas, o bien, para cargas dinámicas. Para realizar este calculo se toman en cuenta las cargas en una ubicación dada de la soldadura (la zona mas critica en el perfil más critico en cada caso de geometría), que son típicamente una combinación de tensión o compresión directas, corte directo, flexión y torsión, estas se definen continuación

- **P:** Carga Axial $[N]$
- **V:** Cortante $[N]$
- **M:** Momento flector $[Nm]$

$$f_n = \frac{P}{A_w}\,[N/m] \tag{22}$$

$$f_s = \frac{V}{A_w}\,[N/m] \tag{23}$$

$$f_b = \frac{M}{S_w}\,[N/m] \tag{24}$$

$A_w$ y $S_w$ se calculan de acuerdo a la geometría de la soldadura siguiendo la información tabulada por Norton. En este caso, se realizara soldadura de aristas superiores y laterales únicamente, por lo cual se tiene los siguiente

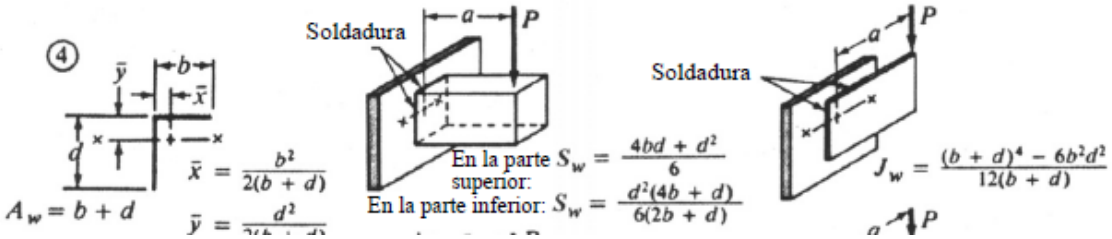


Figura 94: Tipo de soldadura a realizar .

Una vez se tiene la carga por longitud se supone el peor escenario que es donde estas cargas no se cancelan entre si y todas aportan al componente de magnitud:

$$F_R = \sqrt{f_n^2 + f_s^2 + f_b^2} \tag{25}$$

No se tomo en cuenta el componente producido por el Torque sobre componentes ya que como se observo en el análisis estático esta componente no es apreciable en casi ningún elemento de la estructura.

Con la magnitud de la fuerza por longitud se calcula la garganta de la soldadura como:

$$t = \frac{F_R}{\tau_{permisible}} \tag{26}$$

$\tau_{permisible} = 145\,MPa$ para electrodo tipo E70

Con la garganta podemos entonces calcular el tamaño del filete, que servirá para acotar la soldadura.

$$w = 1,414t \tag{27}$$

Bajo el anterior modelo se plantean las soldaduras para las cargas criticas de cada tipo de perfil y se tabulan los resultados en la tabla.

Cuadro 27: Resultados de análisis de soldadura

| **Sección Critica de cada tipo de Perfil [mm]** | **Cuadrado 50.8x50.8 Vertical** | **Cuadrado 50.8x50.8 Horizontal** | **En L 50.8x50.8** |
|---|---|---|---|
| **F de Tensión Compresión (P) [N]** | 270.4 | 18.684 | 2.697 |
| **F de Cortante (V) [N]** | 12.328 | 119 | 115.09 |
| **M flexión (Mf) [Nm]** | 1656.23 | 1252.3 | 996.687 |
| **Aw [m]** | 0.1016 | 0.1016 | 0.1016 |
| **Sw [mˆ2]** | 0.0022 | 0.0022 | 0.0022 |
| $f_n$ **[N/m]** | 2661.42 | 183.89 | 26.55 |
| $f_s$ **[N/m]** | 121.34 | 1171.26 | 1132.78 |
| $f_b$ **[N/m]** | 770148.49 | 582320.66 | 463460.38 |
| **FR [N/m]** | 770153.10 | 582321.87 | 463461.77 |
| **t [mm]** | 5.311 | 4.016 | 3.1962 |
| **w [mm]** | 7.510 | 5.679 | 4.519 |

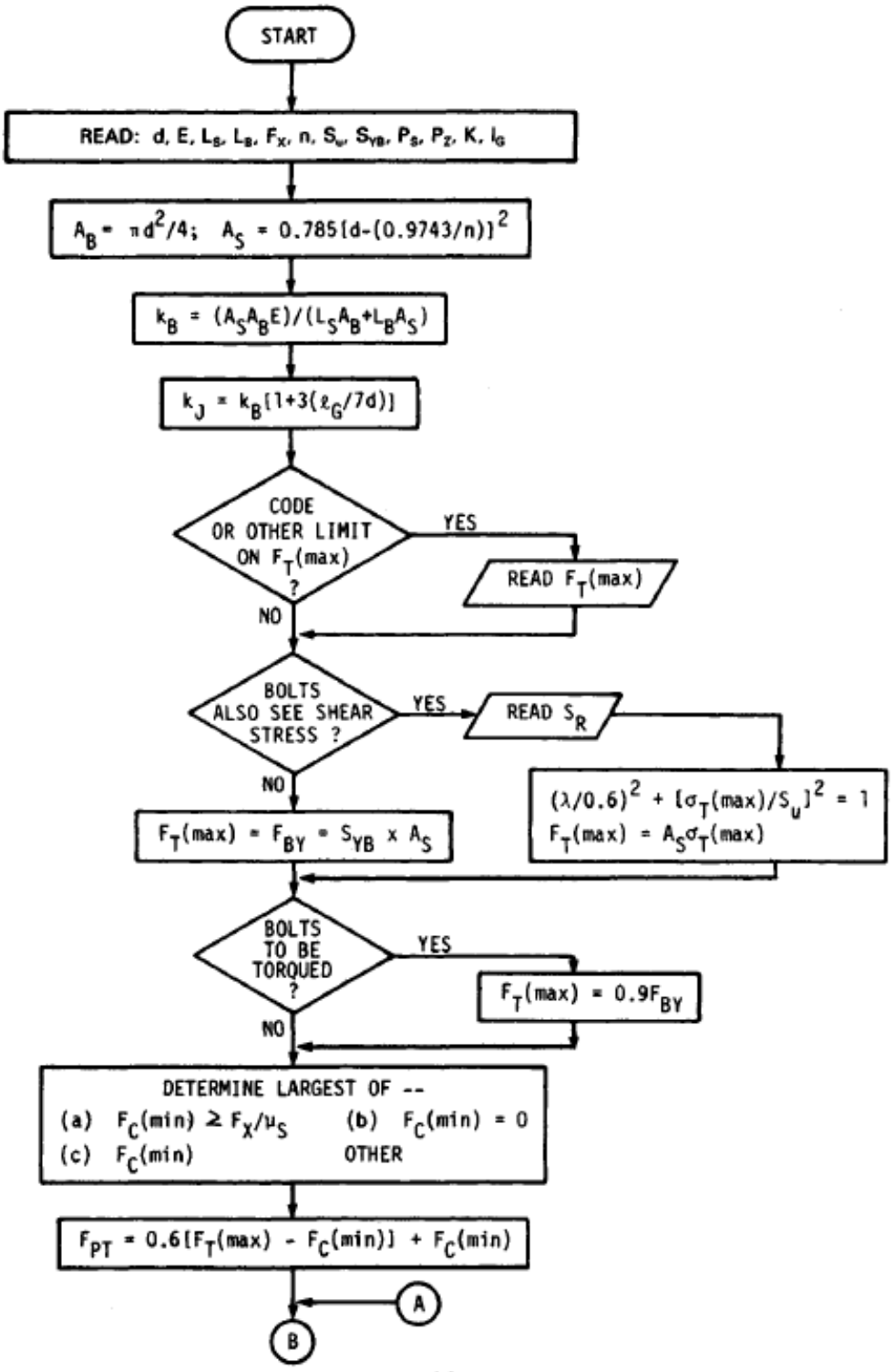
Cabe aclarar que las fuerzas máximas de tensión, cortante y momento flector se determinaron en la sección 1.1.8 con ayuda del análisis estático y las simulaciones realizadas.

## 11.4. Otras uniones

Otras uniones que se necesitan para finalizar el ensamble del prototipo vienen establecidas por los elementos, como las ruedas que necesitan un solo tornillo sujesor de 1/4 in de diámetro por 3/4 de longitud, adicionalmente, para asegurar la sujeción se colocaron 2 tornillos autoroscantes punta de broca numero 8 de 1 in de longitud, para cada rueda.

Adicionalmente se hace uso de remaches de 1/8 de diámetro únicamente para sujetar las platinas galvanizadas y la de inox en al parte superior, ya que estas no estarán sometidas a grandes cargas.

## 11.5. Algoritmo uniones atornilladas de Shigley




(a)

Figura 95: Algoritmo para diseño de uniones atornilladas de Shigley.

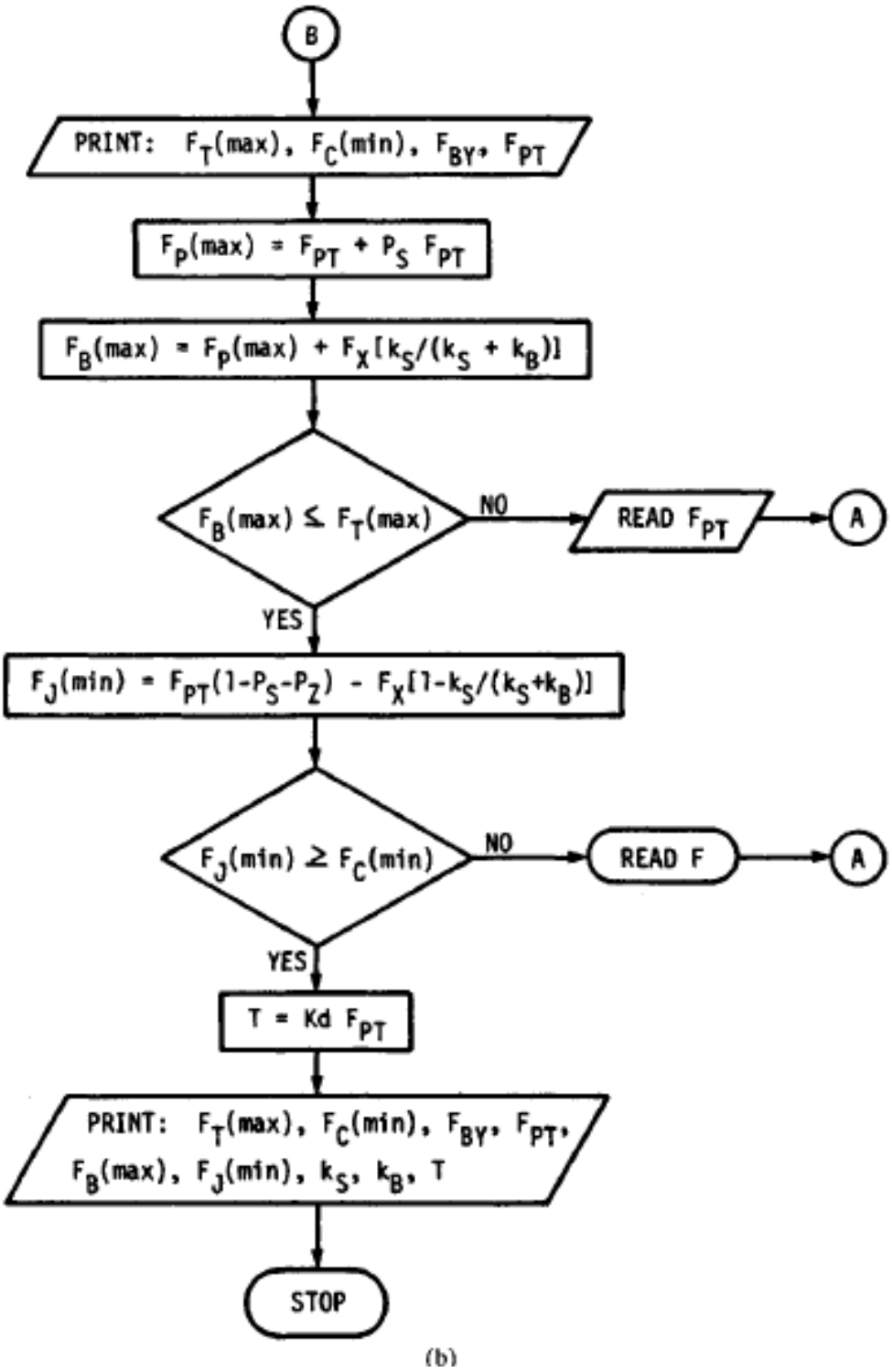



Figura 96: Algoritmo para diseño de uniones atornilladas de Shigley.

# 12. Manufactura y fabricación

## 12.1. Sistema de corte

- Cuchilla: lo primero que se mando a fabricar fue la cuchilla, esta se mando a Hermafil de colombia y se realizaba mediante el corte de una cuchilla estándar y retemplado de la misma segun las dimensiones de os planos la cuchilla tuvo demoras y tardó al rededor de 20 dias pero se recibió en perfectas condiciones y con las dimensiones adecuadas como aparece a continuación.

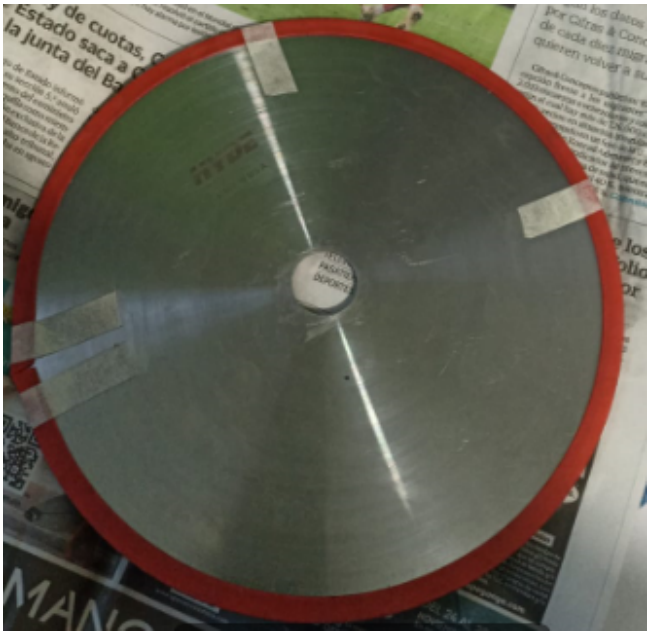


Figura 97: Cuchilla de corte

- Poleas: las poleas se mandaron a fabricar por catalogo a Intermec, la polea de 20 dientes ya la tenían fabricada pero ciega, y la polea de 40 dientes no la tenían fabricada, por lo que la estimación de tiempo fueron 15 días hábiles, y las recibimos justo en el tiempo limite establecido, estas se realizaron en duraluminio 7075 y se entregaron junto a la correa que si la tenían lista.

Figura 98: Poleas

- Eje y acople: En cuanto al eje y al acople inicialmente se iba a utilizar un proveedor de barras de duraluminio que nos mecanizaba todo, pero al realizar las cotizaciones subieron los precios en cantidades extremas por lo que finalmente se decidió comprar la barra de duraluminio y llevarla a un centro de mecanizado donde trabajaran torno y ahí mismo se demoró un día en realizar ese mecanizado de acople y eje con las dimensiones y requerimientos establecidos, sin errores que corregir, solo se tuvo que ajustar los diámetros donde entraban las poleas para asegurar los ajustes deslizantes pero al final todo salio correctamente.

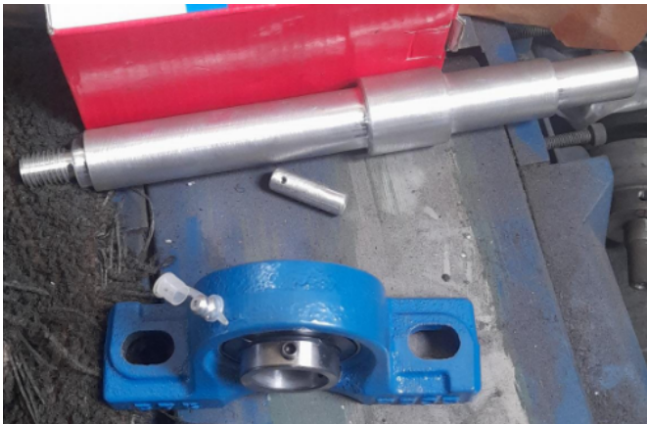


Figura 99: Eje y acople

- Finalmente con todas las piezas obtenidas, las chumaceras compradas, prisioneros, las tuercas de sujeción y la base del motor se realizo todo el montaje del sistema de corte que fue el primer sistema que se tuvo correctamente, y resulto en un completo éxito, pues todo se ajusto como debía y funciono correctamente.

Figura 100: Sistema de corte

## 12.2. Sistema de alimentación y transporte.

Una vez generado el modelado del sistema de transporte se realizan los planos de fabricación (Ver en anexos) los cuales se compartieron con diferentes proveedores para realizar cotizaciones.

Cabe aclarar que este fue el único sistema que se manufacturó por fuera del grupo de trabajo, ya que era necesaria la manipulación de materiales con los cuales el grupo no esta muy familiarizado, se requería maquinaria que no estaba al alcance y de la igual manera, era necesario garantizar algunas tolerancias de fabricación y un buen ensamble.

Inicialmente se cotizo con la empresa Faproinox para realizar el ensamble completo del sistema de transporte, sin embargo, se tuvieron problemas de compromiso por parte de esta empresa por lo cual se tomo la decisión de cotizar con otras empresas. Finalmente, se cotizo con al empresa IDC (Ingeniería y Diseños Cortés S.A.S) la fabricación de la platina de acero inoxidable 304 para la mesa, los soportes en Y en acero inoxidable 204, las dos pestañas en acero inoxidable 304, las placas de contacto de acero inoxidable 304, el acople de acero inoxidable 304, las pestañas retenedora de acero inoxidable 304, en las cuales se requirió soldadura MIG, y las carcasas de acero inoxidable 304. (La relación Nombre-Pieza se puede evidenciar en el anexo de planos)

El proceso de fabricación fue de la mano del encargado de la empresa, en donde se clarificaron algunos aspectos y se optaron los métodos mas sencillos de fabricación. A continuación se muestra un poco de este proceso

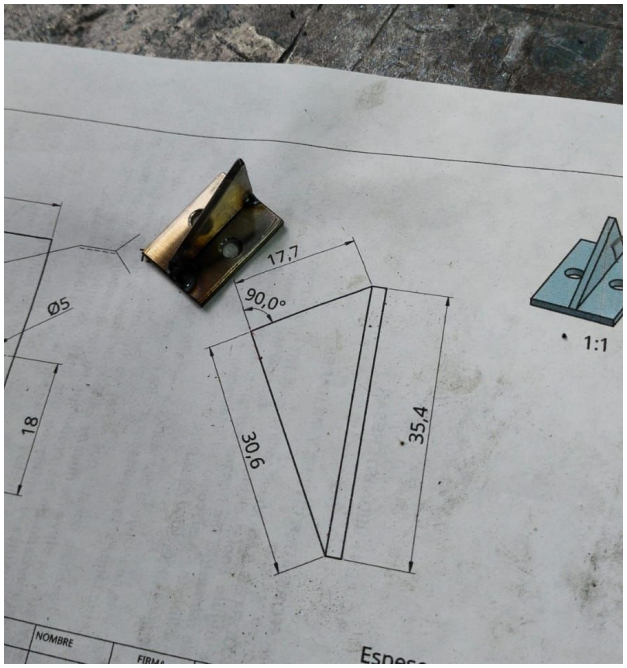


Figura 101: Fabricación de pestañas retenedoras

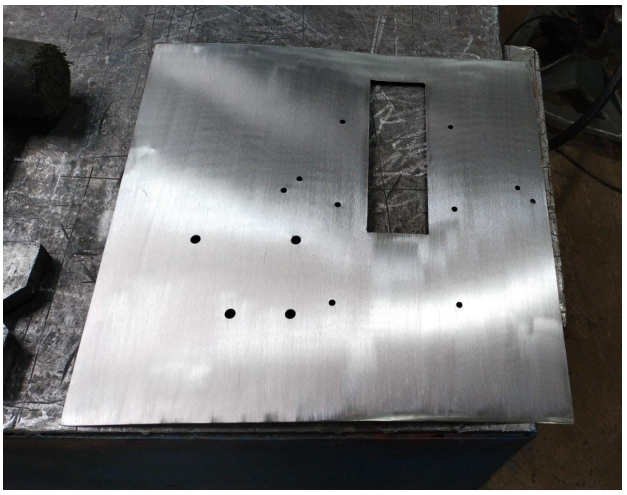


Figura 102: Fabricación Placa de inox para la mesa

Figura 103: Fabricación y unión de pestañas, acople y placas de contacto

Figura 104: Unión de pestañas, acople, placas de contacto y soportes en Y

Figura 105: Ensamble sistema de transporte en etapas finales

Figura 106: Ensamble final sistema de transporte

Es importante mencionar que el producto entregado por la empresa IDC no fue el ensamble de manera rígida, pues se entregaron las piezas por aparte para realizar el ensamble de este sistema a la mesa del prototipo, para asegurar así mismo la configuración deseada. El último elemento agregado a este sistema fue la manija de sujeción, esta se realizó por parte de un integrante del grupo, acoplando un perfil tubular a un agarre disponible, manteniendo la ergonomía y sencillez en pro a la comodidad y facilidad de operación para el operario.

## 12.3. Estructuras y control

- Estructuras: para la fabricación de las estructuras se optó por la manufactura en un taller propio, al ser acero estructural, la fabricación, corte y soldadura de toda la perfilaría era un proceso relativamente sencillo, y posterior a haber comprado la perfil ería en un día se manufacturó completamente la estructura total, la estructura de corte y la del sistema de salida del banano tal como se ven en la imagen, y posteriormente se mandó a pintar con pintura electrostática que proteja correctamente la estructura de la intemperie y le de un toque estético a la maquina.

Figura 107: Estructuras

- Caja de mando: para el sistema de control se requirió la fabricación de la caja de mando donde se ubicarían los botones y display del sistema, esta se mando cortar y doblar en acero galvanizado y en un día se tuvo para poder ubicar los componentes, la manufactura no fue de alta precisión por lo que varios agujeros y ranuras se tuvieron que ampliar para que los componentes encajaran.

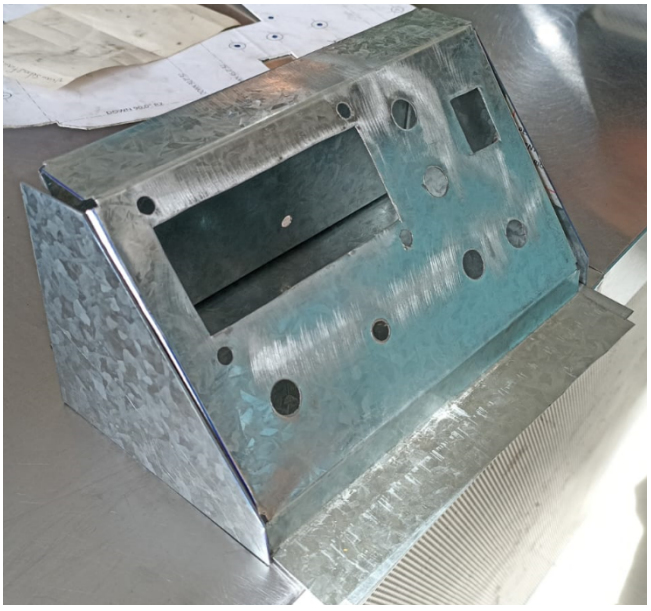


Figura 108: Caja de mando

## 12.4. Ensamble general

Para el ensamble general si hubo diferentes inconvenientes de alineación e integración de los subsistemas, pues el sistema de transporte quedo más grande de lo esperado, por lo que la cuchilla quedo desalineada, pero se ajusto con diferentes elementos, teniendo en cuenta que habían tolerancias en agujeros y se podían realizar ajustes ya que la estructura no tenia ningún agujero. finalmente se logro ajustar completamente la integración de cada subsistema logrando las alineaciones correctas y dejando espacio necesario para lo que es el sistema de control y resultando en un ensamble mecánico exitoso.

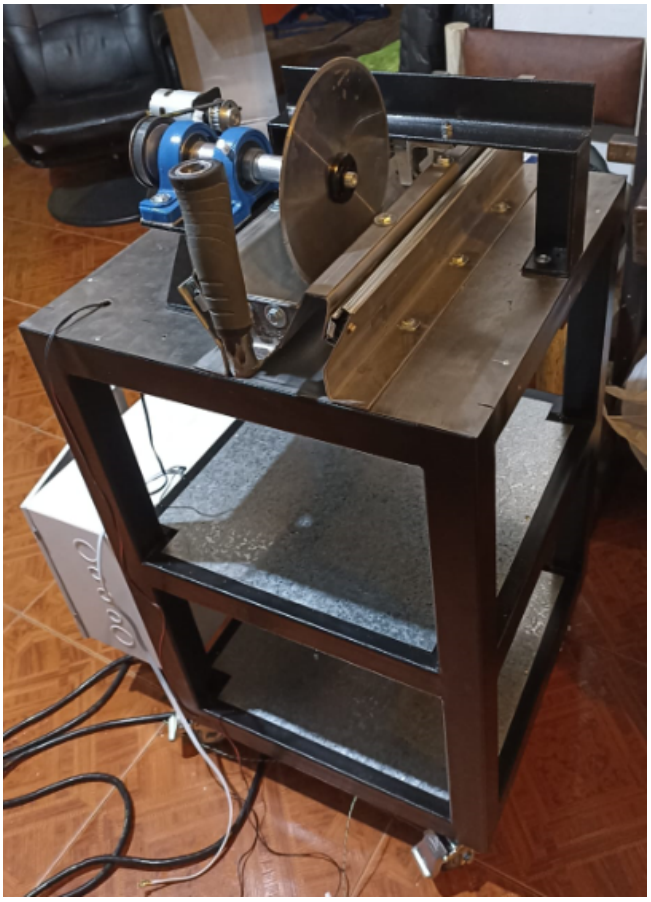


Figura 109: Ensamble general

# 13. Validación

## 13.1. Sistema de control

Para la validación del sistema de control se van a realizar pruebas de funcionamiento de la MEF experimentales, y así mismo de pruebas de funcionamiento del voltaje PWM entregado para casos de $0\,\%$, $25\,\%$, $50\,\%$ y $100\,\%$. Solamente se van a documentar los casos que sean documentables, ya que el resto serán validados mediante la planilla impresa del protocolo de validación.

### 13.1.1. Funcionamiento MEF

La manera de validar el funcionamiento de la MEF es principalmente mediante el análisis del mensaje impreso por el display LCD 20x4. Si este es capaz de funcionar del mismo modo que se evidencia en la verificación y acorde a la programación en C, implica que se ha logrado validar cada una de las etapas de la MEF, al igual que las comunicaciones entre componentes de control. Dicho esto, se realizó la validación de este sistema.

Se prende el sistema de control:

Figura 110: Validación de etapa E0 de la MEF

Se espera un tiempo de $3s$:

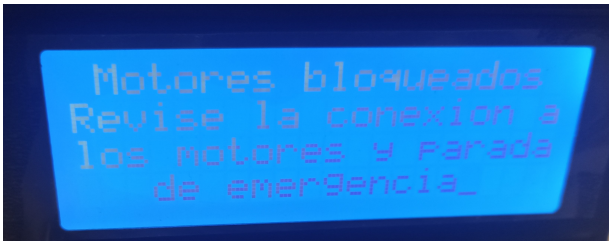



Figura 111: Validación de etapa E1 de la MEF

Se desbloquea el sistema activando el funcionamiento de motores y desactivando la parada de emergencia:

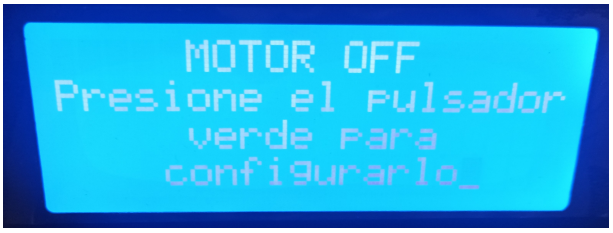



Figura 112: Validación de etapa E2 de la MEF

Se presiona el pulsador verde. Se ajusta para un caso particular de funcionamiento del 0 %. Solo se realiza esto para este caso, en la siguiente etapa se realiza otra iteración pero con funcionamiento del 100 % para mostrar el rango de configuración del pwm.

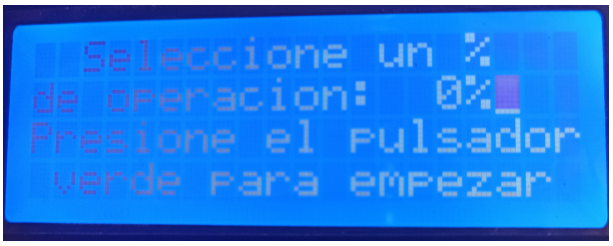



Figura 113: Validación de etapa E3 de la MEF

Se presiona el pulsador verde para prender el motor:

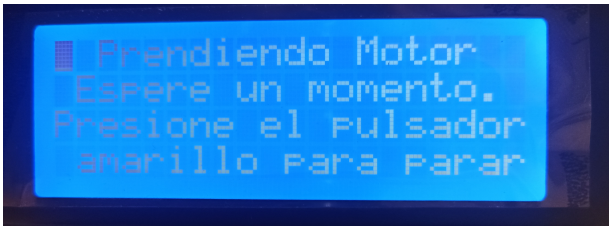



Figura 114: Validación de etapa E4 de transición del motor de la MEF

Se espera $5\,s$ hasta que el motor entre en estado estable:

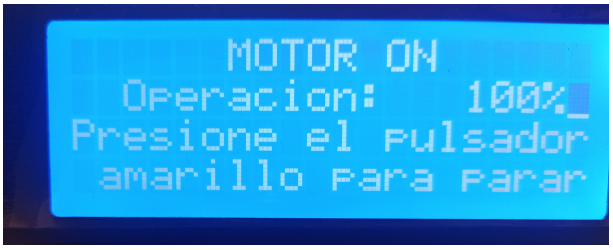



Figura 115: Validación de etapa E4 de establecimiento del motor de la MEF

De este modo, se realiza la validación de la MEF mediante el análisis de impresión del display LCD 20X4.

### 13.1.2. PWM entregado

Para realizar el proceso de validación del PWM, y voltaje entregado al motor, se realizan las cuatro mediciones mencionadas anteriormente, calculando el error porcentual de voltaje de pwm como $|V_{pwm_{teorico}} - V_{pwm_{real}}|/V_{pwm_{teorico}}$, y del voltaje de salida al motor como: $|V_{m_{teorico}} - V_{m_{real}}|/V_{m_{teorico}}$. Cabe aclarar que cuando se realiza un caso con referencia de PWM=0, no es posible calcular este error debido a una división por 0, pero para el resto de casos es válido este cálculo, donde se debe tener una cota de error menor al $10\,\%$ para validar el funcionamiento y así garantizar la integración de control del PWM.

Cuadro 28: Datos de validación de voltaje entregado

| PWM seleccionado | V pwm teorico (V) | V pmw real (V) | Error pwm ( %) | V out teórico (V) | V out real (V) | Error V out ( %) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0.4 | - |
| 25 % | 1.25 | 1.23 | 1.60 % | 6 | 5.62 | 6.33 % |
| 50 % | 2.5 | 2.47 | 1.20 % | 12 | 11.86 | 1.17 % |
| 75 % | 3.75 | 3.71 | 1.07 % | 18 | 18.1 | 0.56 % |
| 100 % | 5 | 4.9 | 2.00 % | 24 | 24.1 | 0.42 % |

Como se puede evidenciar en la tabla 28, se obtienen resultados esperados, donde el error para ninguno de los casos fue mayor al $10\,\%$, motivo por el cual se puede dar por finalizada satisfactoriamente la validación del sistema de control.

## 13.2. Sistema de corte

Para la validación del sistema de corte se realizaron las pruebas indicadas en el protocolo de validación, en este protocolo se indica la validación de dos parámetros básicos, la velocidad de corte y la limpieza del corte midiendo que las mitades correspondan a lo esperado y que no salgan mitades diferentes en un error demasiado alto que ya corresponda a fallo en la eficacia de corte y genere el rechazo del banano cortado.

Para la prueba se realizaron 20 cortes, donde los tiempos y medidas de cada uno se muestran en la tabla a continuación.

Finalmente se puede concluir que el funcionamiento de la maquina es el correcto y cumple con los parámetros de corte que solicitó el cliente y se puede utilizar la máquina tal como se dejó para su destino final.

| Prueba con pausa entre cortes para medición. | | | | |
|---|---|---|---|---|
| N° Corte | Tiempo | Mitad 1 | Mitad 2 | Err % |
| 1 | 5 | 14 | 16 | 0,067 |
| 2 | 3,6 | 16 | 16 | 0,000 |
| 3 | 3 | 15 | 18 | 0,091 |
| 4 | 2,8 | 15,5 | 15 | 0,016 |
| 5 | 3 | 16,5 | 15 | 0,048 |
| 6 | 2,8 | 15 | 16,5 | 0,048 |
| 7 | 2,6 | 15 | 16 | 0,032 |
| 8 | 2,7 | 17 | 14 | 0,097 |
| 9 | 2,8 | 15 | 15 | 0,000 |
| 10 | 3 | 15,5 | 15 | 0,016 |
| 11 | 3 | 13 | 14 | 0,037 |
| 12 | 3,3 | 16 | 16 | 0,000 |
| 13 | 3,1 | 15 | 15,5 | 0,016 |
| 14 | 2,8 | 17 | 16,5 | 0,015 |
| 15 | [HTML]FFFFFF2,9 | 17,5 | 16 | 0,045 |
| 16 | 3,1 | 16 | 16 | 0,000 |
| 17 | 2,6 | 15 | 15,5 | 0,016 |
| 18 | 2,7 | 17,5 | 16,5 | 0,029 |
| 19 | 2,9 | 18 | 17 | 0,029 |
| 20 | 3,1 | 16 | 16 | 0,000 |
| | | | Promedio | 0,030 |
| | | | Desviacion | 0,029 |

Cuadro 29: Datos de rpuebas de validación de corte

# 14. Conclusiones

- Cuando se realiza una maquina para un cliente es importante como primera etapa previa al diseño tener un estrecho contacto con este, pues a partir del entendimiento de los deseos de la persona o el grupo se pueden traducir y aterrizar los objetivos y parámetros que debe cumplir la maquina o mecanismo, es importante tener en cuenta el entorno sobre el cual se desarrolla el proyecto y con el cual convive el cliente pues este entorno genera restricciones presupuéstales, de espacio o de recursos y personal disponible.
- El trabajo interdisciplinario y en equipo fue fundamental en el desarrollo del proyecto pues la maquina consta de un componente mecánico y otro de control, si bien por la metodología del proyecto usada se decidió dividir la maquina por subsistemas, la constante comunicación entre los equipos permitió que la funcionalidad fuera armónica y que los subsistemas se acoplaran como era debido en el ensamble final.
- El diseño a detalle es la parte del trabajo que más esfuerzo requirió y la que permitió que cada uno de los integrantes usara sus habilidades para fortalecer al equipo enfocándose en lo que el integrante fuera más hábil optimizando el tiempo, sin embargo la parte más problemática del proyecto fue la manufactura de las piezas pues surgieron distintos problemas dentro del cual el más destacado fue la falta de garantías en tiempos de entrega pues las partes hechas por terceros fueron causa de retraso en el ensamble de la maquina y por ende en el cumplimiento a cabalidad del cronograma de trabajo.
- La manufactura de la maquina puede llegar a ser el punto más crucial durante todo el proceso de la materia, y usualmente como uno depende de terceros y la mayoría de las veces no se cumplen los tiempos que se dicen y muchas veces hay que estar encima de los fabricantes, y para nosotros fue el proceso que mas nos retuvo y nos generó demoras para procesos de validación y registro, por lo que es recomendable en próximas ocasiones programar más tiempo a esta etapa del proceso.

# Referencias


[1] H.-D. Tscheuschner, *Fundamentos de tecnología de los alimentos*. 2001.

[2] G. S. A. E. Kostaropoulos, *Handbook of Food Processing Equipment*. 2001.

[3] J. E. Shigley., *Standard handbook of machine desing*. 2004.

[4] P. Childs, *Mechanical Design Engineering Handbook*. 2019.

[5] E. O. F. Jones, *Machinery's Handbook*. 2012.

[6] W. Pilkey, *Stress Concentration Factors*. 2007.

[7] G. Kaufmann, *Introduction to Aluminum Alloys and Tempers*. 2000.

[8] J. S. C. Mischke, *Standard Handbook of Machine Design*. 2004.

[9] Mikipulley, *How to Use Hexagon Socket Set Screws*, Last accessed 10 May 2023. dirección: https://www.mikipulley.co.jp/EN/Services/Tech_data/tech14.html.

[10] M. Spong, S. Hutchinson y M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control* (Wiley select coursepack). Wiley, 2005, ISBN: 9780471765790. dirección: https://books.google.com.co/books?id=muCMAAAACAAJ.

[11] Á. Sapena Bañó, *Simulación del motor de corriente continua en "Matlab-Simulink.ª partir de las ecuaciones diferenciales que modelizan su comportamiento*, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Centro Universitat Politècnica de València, 2017.

[12] Procobre, *Conductores Eléctricos*, 2001, ISBN: 956-7776-08-3.

[13] F. eléctricas, *Caja de Paso Tercol 30X30X20*. dirección: https://formaselectricas.com/producto/caja-de-paso-30x30x20/.

[14] R. L. Norton., *Diseño de máquinas*. 2011.

[15] M. D. S. Y. P. SOCIAL, *RESOLUCIÓN 2674 DE 2013*, Last accessed 10 june 2023, 2012. dirección: https://www.funcionpublica.gov.co/documents/418537/604808/1962.pdf/abe38fb4-e74d-4dcc-b812-52776a9787f6#:~:text=Que%5C%20el%5C%20art%5C%C3%5C%ADculo%5C%20126%5C%20del,p%5C%C3%5C%BAblica%5C%2C%5C%20de%5C%20conformidad%5C%20con%5C%20la.

# A. Análisis de proceso

**Análisis de proceso Mariana Amador Rodríguez**

**Formulación del problema:** Para esta etapa del proyecto se contó con la socialización por parte del cliente del problema general de la producción de banano bocadillo y del contexto de la empresa y la asociación con las cuales se trabajaron. Adicionalmente se realizo el PESTAL de la problemática para tener mayor contexto de la situación

**Teoría asociada al problema:** Una vez se tuvo mas amplio el contexto de la problemática se determinaron los grupos de trabajo, en los cuales se pudo distribuir de una mejor forma el trabajo y se empezó a realizar el estado del arte del proceso de diseño de cada sistema

Perteneciente al sistema de alimentación y sujeción, el aprendizaje se dio en su gran mayoría en sesiones con el equipo de este sistema, pues se planteaban soluciones para los problemas que iban apareciendo, adecuándonos, siendo el sistema mas sencillo a los sistemas mas complejos como el de corte principalmente y al de control. Adicionalmente emplee la teoría de diseño de sujeciones tanto atornilladas como soldadas para el diseño estructural, del cual el aprendizaje en su mayoría fue autónomo.

**Metodología de diseño aplicada y métodos utilizados:** El método inicial que se utilizo fue la selección de alternativas a partir de las matrices Pugh, estas permitieron tener una idea mas clara de los requerimientos de cada sistema y de las alternativas mas adecuadas según el contexto en el que se esta trabajando. Adicionalmente se trabaja con la metodología de diseño DIPP, de la cual se saco mucho provecho para el trabajo comunicativo entre sistemas, con el fin de tener alta calidad, fiabilidad y eficiencia en el proceso de manufactura del prototipo final.

Por otro lado se implemento la metodología en V en combinación con la metodología ágil, que fueron nuevas metodologías para implementar en futuros proyectos.

**Cálculos y experimentos de verificación:** Con el equipo de transporte se realizaron distintas reuniones de diseño del sistema, pues ya que este no requirió de mucho cálculos, cada uno de nosotros se enfoco en aportar a otra parte del prototipo que aun no tenia encargado. Por mi parte los cálculos específicos realizados fueron de la sección de uniones, a partir de las especificaciones más criticas. Ya que este tema no tenia encargado trabaje de la mano del compañero Juan Manuel Rubio para conceptos básicos y el desarrollo de la memoria de cálculos.

**Fabricación prototipo:** Por parte del sistema de transporte, la manufactura y fabricación se dio con un proveedor, ya que se estuvieron trabajando con materiales que están fuera de nuestro conocimiento para manipular, igualmente no se contaban con las herramientas adecuadas para hacer las piezas, y se requerían unas tolerancias muy especificas, especialmente en los ángulos y el ensamble del sistema como tal.

**Validación:** La validación del sistema de corte y control estuvo fuera de mis manos pues inicialmente no era mi sistema, sin embargo, se apoyo con la revisión de protocolos de verificación y validación, adicional a la inclusión de esto al informe final, para balancear los tiempos invertidos en el proyecto por parte de todo el equipo.

**Presentación de informe:** Se organizó un documento en latex en donde todos los integrantes del equipo se encargaron de incluir sus aportes en cada uno de los sistemas. Como sistema de transporte, se incluyo el proceso de diseño y selección de elementos y alternativas, adicionalmente se integro diseño y cálculos de la sección de uniones, junto con la sección de 4.

**Análisis de proceso Cristian Alejandro Castrillón Ayala**

**Formulación del problema:** Aprendí que se debe tener en cuenta a todos los involucrados y priorizarlos en orden de alcance y afectación sobre el proyecto para tratar de satisfacer a la mayor cantidad de agentes. Esto lo aprendí en las diferentes reuniones que tuvimos con los clientes y diferentes interesados. Un aprendizaje adicional es que no se puede diseñar sin conocer el contexto donde se instalara la máquina y como se usara, el análisis PESTAL es importante para conocer todos los posibles efectos, consecuencias y limitaciones a las que se podrá ver restringida la solución propuesta. Es importante definir unos alcances claros, lógicos y el tiempo disponible de desarrollo.

**Teoría asociada al problema:** Dado que tuve dos enfoques de trabajo principales durante el desarrollo del proyecto, el primero fue de diseñador de conceptos para la maquina donde la teoría usada fueron las matrices de selección con criterio absoluto y relativo, aprendí a usar las matrices de selección pugh, al ser una maquina desarrollada por todo el equipo de trabajo era importante que todos ejecutáramos activamente esta selección por lo cual fue un aprendizaje grupal. En la segunda parte del proyecto una vez seleccionada la alternativa mi trabajo fueron los cálculos estructurales donde el enfoque usado fue elementos finitos y estática estructural, por lo tanto tuve que empaparme de estas teorías, esto lo aprendí a lo largo del semestre con mi compañero Juan Sanchez con quien trabajamos codo a codo en esta sección.

**Metodología de diseño aplicada y métodos utilizados:** Se usó la metodología de la NASA donde la maquina se debía dividir en subsistemas donde el proceso de diseño de cada uno se ejecutaba de manera individual sin perder la cohesión entre subsistemas, aprendí en esta etapa que es importante seleccionar una metodología con la cual todo el equipo se sienta a gusto, a su vez que es importante realizar una investigación de metodologías pues hay algunas que se ajustan mejor a un tipo de proyectos que a otros.

**Fabricación prototipo:** Aprendí que se debe empezar la fabricación con mucho tiempo de antelación ya que cuando hay pizas que se deben tercerizar el margen de entregas es muy amplio y ocasiona que hallan retrasos en la fabricación, adicionalmente que se debe hacer una amplia investigación de fabricantes ya que muchos de estos trabajan con una inflación de precios y no son cumplidos con las fechas de entrega. Esto lo aprendí durante la cotización y realización de pagos a fabricantes donde tuvimos que estar muy encima de estos para tratar que nos mantuvieran las fechas establecidas de entrega.

**Validación:** Para validar conceptos aprendí que se deben tener planes económicos que permitan la validación de subsistemas importantes ya que con esto se pueden descartar conceptos que en principio pareciesen funcionar y al final no se ajustan a la máquina.

**Presentación de informe:** Si se va a realizar un informe con tantos compañeros es importante hablar sobre lo que va a poner cada uno ya que si bien todos manejamos la misma información hay quienes la saben explicar mejor y a la hora de dividirse sería malo repetir información.

**Análisis de proceso Andrés Holguín Restrepo**

**Formulación del problema:** Con todo el equipo, al inicio del semestre se aprendió a interpretar las necesidades y objetivos de nuestro cliente en requerimientos funcionales y cuantificables. Esto fue necesario para definir el alcance del proyecto y poder llegar a un acuerdo formal con el cliente.

**Teoría asociada al problema:** Semanas después de formular formalmente el problema, logramos aprender del estado del arte de cortadoras de frutas industriales, con el fin de lograr una selección de un diseño adecuado para cortar bananos tipo bocadillo. Cada uno presentó sus bocetos y mediante implementaciones de matrices de Pugh se logró llegar a una decisión entre todos.

Dado mi enfoque de control, se implementa la teoría de máquina de estados finitos para la programación de estados adecuada de un microcontrolador PIC18F4550. Además, se realiza la teoría de control por PWM para regular el accionamiento del motor. Se aprende de los datasheet de Microchip para la programación del microcontrolador y del libro "Robot dynamics and control" de Spong para el desarrollo de control de movimiento.

**Metodología de diseño aplicada y métodos utilizados:** Se realiza una metodología de diseño DIPP para esta parte de control, donde se enfoca el diseño del producto simultáneamente que el diseño del proceso de manufactura, logrando unificar estas dos etapas desde un principio. Esto fue necesario aprenderlo ya que sin importar que la simulación funcionara, si no se tenía en cuenta la etapa de proceso, no serviría nada de lo que se había realizado. De este modo, se aprendió esta metodología a través de diversos cursos en simultáneo como lo es APM para mecatrónicos.

**Cálculos y experimentos de verificación:** Con el compañero Mancilla, se realizan los cálculos y diseño de la etapa de potencia y de control, además de las PCB y calibres de los cables a implementar y todos los componentes físicos de la etapa. Se realiza la verificación mediante softwares de simulación del microcontrolador como MPLABX. Además, se realizan los cálculos de los perfiles de velocidad del motor correspondientes al accionamiento de voltaje mediante PWM. Estos perfiles se verifican mediante simulación en Simulink.

**Fabricación prototipo:** Inicialmente se realiza el prototipo de control funcional en protoboard. Luego se realiza la adquisición de todos los componentes de control y la soldadura de las PCB prototipo, donde se implementa el prototipo en una placa de montaje en MDF para verificar disposición de componentes. Para esto se aprende de técnicas de manufactura aditiva y corte laser para lograr generar ya sea piezas o placas de montaje.

**Validación:** Al finalizar el proyecto, se realiza el ensamble del cofre de control junto con la HMI, soldadura y validación de PCB finales, y se realiza el enrutamiento de cables de manera adecuada. De este modo, se logra validar el sistema de control y poner a funcionar el motor para el sistema de corte. Se aprende de la NTC2050 para todo el tema de enrutamiento de cables, calibres, disposición de componentes, entre otros temas relacionados con la parte eléctrica de la etapa de control.

**Presentación de informe:** Mediante la organización de un informe en LaTeX, todo el grupo de trabajo logró realizar un informe bien estructurado y segmentado por cada una de las secciones de trabajo realizadas, en mi caso, enfocadas en las secciones de diseño de sistema de control, electrónico y eléctrico, junto con el manual de uso de funcionamiento de la cortadora. Aprendí a aprovechar todas las ventajas que tiene generar informes en este entorno, como el manejo de múltiples archivos, control de imágenes, y demás.

**Análisis de proceso Daniel Fernando Mancilla Amaya**

**Formulación del problema:** Aprendí cómo se planea un problema de forma específica a partir de requerimientos y objetivos, basándome en las conversaciones con el cliente y mis compañeros de equipo. También, aprendí sobre la traducción de los requerimientos a las especificaciones de ingeniería. En esa etapa trabajé activamente en la discusión generada tanto en los espacios de la universidad como en los que se dieron fuera de esta en diversas reuniones.

**Teoría asociada al problema:** Nuestro problema se basa en el corte de bananos tipo bocadillo para hacerles un proceso de deshidratación. A partir de esto, sabiendo que existen diferentes contextos, dividimos esta parte empleando la metodología PESTEL para hacer un análisis y posterior socialización que nos permitiera entender realmente las implicaciones del desarrollo del proyecto. Una vez realizado este proceso se dimensionó el proyecto y el impacto que podría llegar a tener en la industria productora agrícola del país, lo que se alineaba con los objetivos del cliente.

**Metodología de diseño aplicada y métodos utilizados:** Para este capítulo, se inició con una revisión de bibliografía de diferentes métodos, además se dio el espacio de clase en que se presentaron algunas metodología que fueron la base para la revisión previamente mencionada. En esta fase tuvimos en cuenta metodologías sistemáticas o integradoras. Finalmente, en grupo se decidió utilizar una metodología que nos permitiese hacer pruebas a la vez que se avanzaba en el proceso de diseño de detalle de cada subsistema, este aspecto considero que nos permitió avanzar de buena forma durante el desarrollo, pero, personalmente, también se me dificultó seguir a cabalidad la metodología establecida en algunos momentos.

**Cálculos y experimentos de verificación:** En la parte de metodologías, específicamente me desempeñé en el diseño y prototipado del subsistema de control junto con Andrés Holguin. Para esto tuve que aprender a utilizar software especializado en esta parte (Kicad), y aprender a hacer cableados en una nueva herramienta como lo fue Onshape. Adicionalmente, me di cuenta de lo fundamental que es la iteración en el desarrollo del proyecto, ya que muchas veces es imposible realizar varios prototipos por los costos que esto puede generar y lo que está dispuesto a invertir el cliente en esta etapa. Por último, me gustaría resaltar la interdisciplinariedad que se muestra en todas las etapas del proyecto, porque debía mantener una comunicación activa con los demás miembros de mi equipo para así no tener problemas en el ensamble de la máquina y disponer de los espacios pertinentes para la ubicación del subsistema del que estaba encargado.

**Fabricación prototipo:** En esta parte se dan muchos espacios de aprendizaje, ya que hay que tratar con empresas y personas diversas que, por lo general, no son cumplidos con los plazos e incluso precios que dan en un primer contacto. A partir de estas experiencias logré ver mejor el panorama que se da en nuestro contexto, y las dificultades reales que por lo general no se tienen en la academia. Todo lo anterior fue una experiencia en conjunto con mis compañeros, algunas veces se repartía la tarea de ir a hacer la cotización y compra de algo específico de forma individual, o íbamos en conjunto. Adicionalmente, las fabricaciones en nuestro caso se atrasaron, por lo que otra experiencia de aprendizaje fue la negociación con el cliente de los alcances del proyecto y la elaboración de los planes de contingencia para obtener los resultados esperados

**Validación:** Este proceso resulta de lo más complicado debido a que muchas cosas no resultan como se había planeado, o simplemente ha ocurrido algún error que cambia los planes. La validación me enseñó a tener en cuenta detalles de ensamble, y a valorar este trabajo, porque todo puede estar bien diseñado, sin embargo, si no se hace esta parte cuidadosamente todo puede salir mal. La parte en la que me centré es la del sistema de control, ya que en esta fue la que trabaje, sobre todo en la del *human interface*.

**Presentación de informe:** Para el informe se hizo un primer avance temprano en el desarrollo del proyecto en el que se logró información básica. A partir de esto, se comienza a trabajar en la articulación y definición de cada una de las secciones, teniendo especial énfasis, para mi caso, en el manual de ensamble de la máquina, el diseño del sistema de control y el diseño del sistema eléctrico. Es importante resaltar que una vez se tiene todo listo parece fácil redactar lo pertinente en el informe, sin embargo, es una tarea que resulta de cuidado y con la que terminamos nuestro proceso de aprendizaje de la asignatura.

**Análisis de proceso Nicolás David Ávila-Rey**

**Formulación del problema:** En primer lugar aprendí sobre el contexto alrededor del proceso de deshidratado del banano bocadillo, algunas de sus problemáticas como tiempos de oxidación o estética visual para poder ser exportado. Fue un aprendizaje conjunto adelantado al inicio del proyecto, donde se realizó un análisis PESTEL mediante bibliografía y contacto con algunos de los involucrados directos (cliente y uno de los agricultores de la asociación). De igual forma pude ser más consciente de la poca tecnificación en el agro Colombiano, y poder notar como para algunas problemáticas puntuales, hay espacio para considerar soluciones de ingeniería que no son demasiado complejas ni costosas de ejecutar.

**Teoría asociada al problema:** Para poder modelar de forma adecuada algunos de los parámetros de corte tales como los rangos de fuerzas o grados de maduración de los bananos bocadillo, fue necesario conocer equipos y pruebas hasta ahora desconocidas, como aquellas que usaban el texturómetro y colorímetro disponibles en el laboratorio de agrícola. También se realizó una división del equipo por subsistemas de la máquina, en mi caso puntual, el trabajo quedó para el subsistema de transporte, en donde aprendí junto con mis compañeros de subgrupo, cuales eran los materiales típicos y que cumplían la norma para maquinaria agrícola.

**Metodología de diseño aplicada y métodos utilizados:** Fue necesario plantear varias alternativas para poder ser evaluadas en una matriz de Pugh, considerando mecanismos disponibles en el mercado o alternativas propias. De igual forma, pensando en no exceder el presupuesto, se usó teoría de pandeo para poder elegir un calibre de lámina elevado pero lo suficientemente rígido como para no pandearse, usando ecuaciones de diseño y software de elementos finitos. Además se aprendió a usar algunas funciones de onshape para modelar geometrías que se acoplaran al diseño. Además, un factor clave fue la retroalimentación de algunos de los manufactureros respecto a la viabilidad de los diseños mostrados así como la disponibilidad de alternativas a precio razonable en el mercado. Con esta retroalimentación se fue iterando el diseño para ir acoplándose de manera adecuada.

**Fabricación prototipo:** Considero que esta parte es totalmente pertinente dentro del proceso de ingeniería e igual de valida que cualquier otra. Junto con Juan Sebastián nos hemos apersonado bastante de la logística y adquisición de materiales/servicios, lo cual ha requerido de múltiples llamadas, correos y desplazamientos para poder obtener cotizaciones e información clara que permita comparar y tomar las decisiones más adecuadas para poder seguir con la realización de la máquina. Hemos aprendido también que es muy frecuente que se incumplan los tiempos de entrega acordados y también la tendencia a cobrar montos elevados, cuando una pequeña modificación u alternativa podría salir mucho menos costosa. Sin embargo, también hay que destacar la buena disposición de algunos manufactureros, pues su retroalimentación ha sido muy útil para encontrar una solución más viable y también para guiarnos en los procesos burocráticos y formalidades alrededor de la compra de materiales y/o servicios de manufactura.

Hasta el momento habíamos venido seleccionando chumaceras y rodamientos marca SKF, debido a su reputación, accesibilidad de información y modelado CAD. No obstante, al momento de comprar evidenciamos que sus precios en ocasiones triplican los de algunas alternativas en el mercado, y ha sido necesario revisar dichas opciones, para eventualmente cambiar la selección inicial.

**Validación:** Para la sustentación se acordó con el cliente no validar aún el sistema de transporte. Sin embargo dado el oportuno arribo de los materiales se ensambló toda la máquina. Conceptualicé el sistema que evita el retorno de los bananos y pudimos validar su funcionamiento ya que efectivamente logra retener las mitades cortadas con el retroceso del cajón, haciendo que estas caigan a la canasta de recolección.

**Presentación de informe:** Cada uno de los miembros del equipo fue añadiendo secciones así fuesen parciales. Todo se hizo en Overleaf, aprovechando el entorno colaborativo y la organización que se le puede dar.

**Análisis de proceso Juan Manuel Rubio Vanegas**

**Formulación del problema:** Aprendí a interpretar requerimientos el cliente o del problema como solicitaciones de diseño mediante prueba y error, y evaluación de alternativas y propuestas, durante las dos primeras semanas del proyecto. Fue un aprendizaje conjunto con el equipo de trabajo y era una habilidad necesaria para completar el proyecto con satisfacción. Tambien comprendí la importancia de mantener contacto sólido con el cliente, para evitar malentendidos en etapas tardías del proyecto. La comunicación debe ser efectiva y fluida, para que no queden vacíos conceptuales.

**Teoría asociada al problema:** Aprendí sobre el contexto ambiental del problema y todo lo que implica en ese ámbito, a partir de investigación individual. No se aprendió todo el posible conocimiento que se podía al respecto por falta de tiempo. Aprendí un poco sobre lo que los demás compañeros expusieron, pero para poderlo comprender todo como un concepto propio del proyecto tuve que leer las rúbricas y comprender la importancia del contexto.

**Metodología de diseño aplicada y métodos utilizados:** Aprendí a seguir adecuadamente un plan de trabajo establecido, a partir de definición de subsistemas del equipo y delegando funciones. Aprendí también a confiar más en las habilidades de mis pares y también a contemplar que no todos pueden trabajar en todo momento y que por eso es bueno delegar funciones. Esto fue un proceso iterativo y de constante corrección, lo que me enseño a trabajar pacientemente y a trabajar de forma metódica y organizada. Aprendí tambien a juntar la información suficiente y necesaria para realizar un diseño, a partir de la combinación de conocimiento con diversas fuentes. Esto me permitió contemplar diferentes metodologías y alcances, así como aproximaciones al diseño de piezas mecánicas.

**Fabricación prototipo:** Aprendí que los procesos de fabricación se deben hacer con tiempo suficiente para contemplar imprevistos y que se debe hacer el correcto seguimiento con los fabricantes para mantener los tiempos controlados. Así mismo, es bueno tener varias alternativas para la fabricación de componentes para no depender de un solo sitio. Fue mi primer acercamiento con situaciones que debían solucionarse rápido y bajo presión, con un ente externo, lo cual siento que me enseñó mucho sobre el trabajo de campo del ingeniero.

**Validación:** Es un proceso que siguió en desarrollo casi hasta el final del proyecto. Enseñó que siempre es bueno dejar mucho tiempo extra para imprevistos y para poder tomar decisiones con calma. Es un trabajo que es bueno realizarlo en equipo para poder combinar diversos puntos de vista.

**Presentación del Informe:** Se ejercitó de nuevo la habilidad comunicativa de conceptos técnicos. Es algo poco empleado en el día a día pero completamente necesario para el ingeniero. Se reforzó la sintaxis y el recorte de la información redundante.

# B. Código C implementado en PIC18F4550

```c
#include<xc.h>
#define _XTAL_FREQ 4000000
#include "LibLCDXC8.h" // Libreria para el control del LCD
#include "string.h"
#pragma config FOSC=INTOSC_EC
#pragma config WDT=OFF
#pragma config LVP=OFF


char Estados=0; // Variable que indica el estado actual del programa
char EstadosPrev=0;  // Variable que almacena el estado previo del programa

//Cambios de estados iniciales
char a=0;
char b=0;
char c=0;
char d=0;

double Duty;// Valor del ciclo de trabajo (duty cycle) para el PWM
//Perfil de velocidad normalizado

int Vals24[]
    ={0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,2,2,2,2,3,3,3,4,4,4,5,5,
    5,6,6,7,7,8,8,9,10,10,11,12,12,13,14,14,15,16,17,18,19,19,20,21,22,23,
    24,25,26,27,28,30,31,32,33,34,35,37,38,39,41,42,43,45,46,47,49,50,52,
    53,55,56,58,59,61,62,64,66,67,69,71,72,74,76,77,79,81,83,84,86,88,90,
    91,93,95,97,99,100,102,104,106,108,110,111,113,115,117,119,121,123,124,
    126,128,130,132,134,136,138,139,141,143,145,147,149,150,152,154,156,158,
    159,161,163,165,166,168,170,172,173,175,177,178,180,182,183,185,187,188,
    190,191,193,194,196,197,199,200,202,203,204,206,207,208,210,211,212,214,
    215,216,217,218,219,221,222,223,224,225,226,227,228,229,230,230,231,232,
    233,234,235,235,236,237,237,238,239,239,240,241,241,242,242,243,243,244,
    244,244,245,245,245,246,246,246,247,247,247,247,248,248,248,248,248,248,
    248,249,249,249,249,249,249,249,249,249,249,249,249,249,249,249,249};
//251 puntos
// Arreglo que almacena los valores normalizados para generar el perfil
    suavizado a 24V

int len = sizeof(Vals24) / sizeof(int); // Longitud del arreglo Vals24
//251 posiciones que generan el perfil suavizado a 24v. El tiempo depende del
    delay entre ellos
// El voltaje depende de una constante 0-1 que multiplique estos valores
unsigned int Conversion(unsigned char); // Funcion para realizar una conversion
    analogica a digital
void imprimir_porcentaje(void); // Funcion para imprimir el valor del PWM en el
    LCD
void Iniciar_Perfil_Vel(void); // Funcion para iniciar el perfil de velocidad
double ValAn_PWM=0; // Lectura del potenciometro (valor analogico)
double Val_PWM=0;   // Valor del PWM calculado en porcentaje
char Val_PWM_LCD=0; // Valor impreso del PWM en el LCD
char Val_PWM_LCD_prev=0; // Valor impreso anterior del PWM en el LCD
unsigned int ts=20; //250 saltos, 250x20ms=5s
//unsigned int ts=40; //250 saltos, 250x40ms=10s
void main(void){
    // Configuracion del oscilador a 4MHz
    IRCF2=1;
```

```
    IRCF1=1;
    IRCF0=0;

    // Configuraciones de pines y registros
    ADCON0=0b00000001;
    ADCON1=13; //Configuracion pines analogos
    ADCON2=0b10001000;
    TRISD=0;
    LATD=0;
    TRISB=0b11111111;

    CCP1CON=0b00001100; //Implementacion PWM
    CCP2CON=0b00001100; //Implementacion PWM

    PR2=249;            //PWM de 4kHz
    CCPR1L=0;            //Duty inicial de 0
    CCPR2L=0;            //Duty inicial de 0
    T2CON=0b00000000;    //Postscaler 1:1, Off, Prescaler 1;
    TMR2=0;              //Prescaler TMR2
    TMR2ON=1;            //Prender TMR2
    TRISC1=0;            //Salida PWM2
    TRISC2=0;            //Salida PWM1 enable LM293D

    //Interrupciones
    INT0IF=0;
    INT0IE=1;
    INT1IF=0;
    INT1IE=1;
    INT2IF=0;
    INT2IE=1;
    RBPU=1;

    RCIE=1;
    RCIF=0;
    GIE=1;               //Activar interrupciones globales
    PEIE=1;              //Activar interrupciones de perifericos

    a=!RB0; //Energia motor




    ConfiguraLCD(4);
    InicializaLCD();

    __delay_ms(250);

    while(1){

        a=!RB0;
        ValAn_PWM=Conversion(0);
        Val_PWM=ValAn_PWM*100/1024;

        switch(Estados){

            case 0: //Inicio de programa
                LATD=0;
                Mensaje_LCD_Var_Mensaje20x4("Systems Solutions SA","UN CORTE","
```

```
    ","Espere un momento");
                Estados=1;

                CCPR1L=0;
                __delay_ms(2000);
                break;

            case 1: //Activar conexion de motores

                RD0=1;
                RD1=1;
                CCPR1L=0;
                c=0;
                if(Estados!=EstadosPrev){
                    Mensaje_LCD_Var_Mensaje20x4("Motores bloqueados","Revise la conexion a ","los motores y parada","de emergencia");
                }
                EstadosPrev=1;
                if(a==0){Estados=1;break;}//Motor desconectado
                else{Estados=2;break;} //Pasar a Motor OFF

                break;
            case 2: //Motores conectados, a la espera de apagado o OP

                RD0=0;
                RD1=0;
                b=1;
                c=0;
                CCPR1L=0;
                if(Estados!=EstadosPrev){
                Mensaje_LCD_Var_Mensaje20x4("MOTOR OFF","Presione el pulsador","verde para","configurarlo");
                }

                EstadosPrev=2;
                if(a==0){Estados=1;break;}//Motor desconectado
                if(d==1){Estados=3;b=0;Val_PWM_LCD_prev=0;break;}//Pasar a OP
                else{Estados=2;break;}
                break;

            case 3: //Seleccionar punto de operacion

                if(b==1){Estados=2;b=0;break;}//Apagar motor

                RD0=1;
                RD1=1;
                d=0;
                CCPR1L=0;
                if(a==0){Estados=1;break;}//Motor desconectado

                if(Estados!=EstadosPrev){

                    Mensaje_LCD_Var_Mensaje20x4("Seleccione un %","de operacion:","Presione el pulsador","verde para empezar");
                    __delay_ms(500);
                    c=0;
                }
                Val_PWM_LCD=Val_PWM;
```

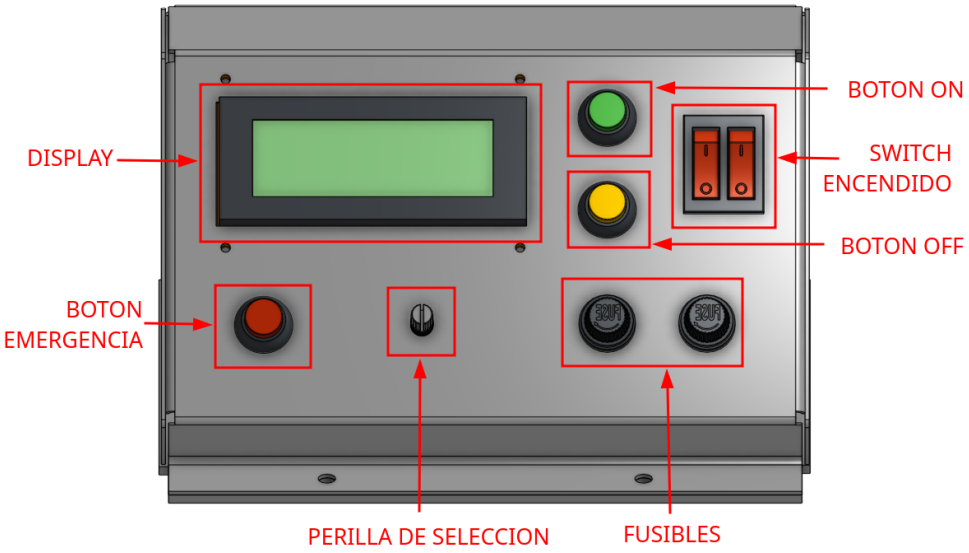
```
                if(Val_PWM_LCD_prev!=Val_PWM_LCD){
                    imprimir_porcentaje();
                }
                Val_PWM_LCD_prev=Val_PWM_LCD;
                EstadosPrev=3;

                if(c==1){Estados=4;c=0;break;}//Prender motor
                break;

            case 4: //Se activa punto de operacion

                if(a==0){Estados=1;break;}//Motor desconectado
                if(b==1){Estados=2;b=0;break;}//Apagar motor
                Duty=Val_PWM/100;
                if(Estados!=EstadosPrev){

                Mensaje_LCD_Var_Mensaje20x4("Prendiendo Motor","Espere un momento.","Presione el pulsador"," amarillo para parar");

                int i;
                for (i = 0; i < len; i++) {
                    if(b==1||a==0){break;}
                    CCPR1L = Vals24[i]*Duty;    // asignar el siguiente valor del arreglo al registro CCPR1L
                    __delay_ms(ts);    // esperar un tiempo definido en ms
                }

                if(a==0){Estados=1;break;}//Motor desconectado
                if(b==1){Estados=2;b=0;break;}//Apagar motor

                Mensaje_LCD_Var_Mensaje20x4("MOTOR ON","Operacion:       ","Presione el pulsador"," amarillo para parar");
                imprimir_porcentaje();
                }
                EstadosPrev=4;
                break;

            default:
                Estados=0;
            break;
        }
    }
}

void interrupt ISR(void){

    if(INT0IF==1){ //Apagar motor
        a=0;
        INT0IF=0;
    }

    if(INT1IF==1){ //Apagar motor
        b=1;
        INT1IF=0;
    }

    if(INT2IF==1){ //Prender motor
```

```
        if(Estados==2){
            d=1;
        }else if (Estados==3){
            c=1;
        }
        INT2IF=0;
    }
}

unsigned int Conversion(unsigned char canal){
    ADCON0=(ADCON0 & 0b00000011) | (canal<<2);
    GO=1;    //bsf ADCON0,1    GO en 1, conversi?n en progreso
    while(GO==1);
    return ADRES; //ADRES almacena en 16 bits el resultado an?logo
}

void imprimir_porcentaje(void){

    DireccionaLCD(0xC0+15);
    MensajeLCD_Var("     ");
    DireccionaLCD(0xC0+15);

    if(Val_PWM>99){
    EscribeLCD_n8(100,3);
    }else if (Val_PWM<=10){
        EscribeLCD_n8(Val_PWM_LCD,1);
    }else{
        EscribeLCD_n8(Val_PWM_LCD,2);
    }
    EscribeLCD_c('%');
    __delay_ms(250);
}
```

# C. Manual de operación

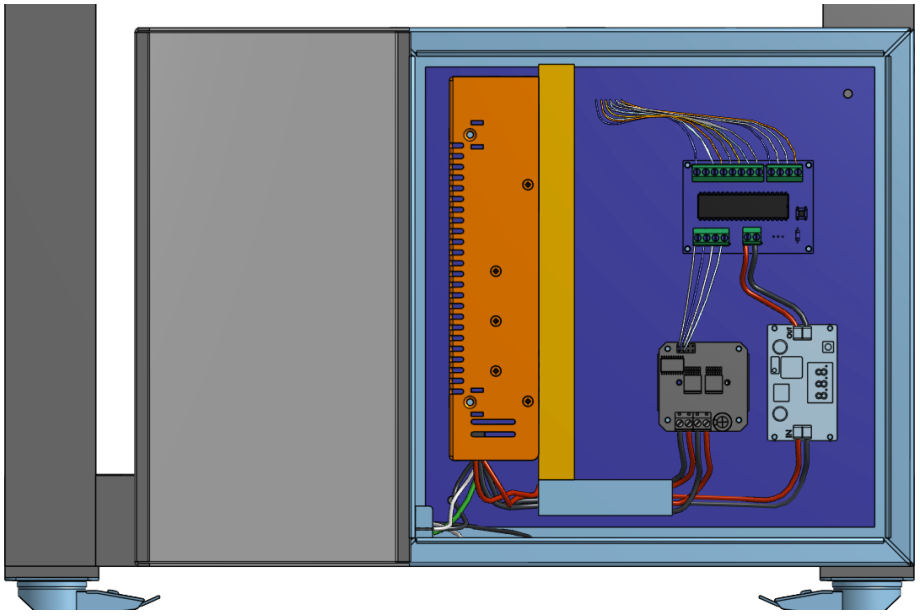
En el siguiente manual se encuentran las instrucciones paso a paso para poner en funcionamiento la cortadora de bananos tipo bocadillo.

## C.1. Disposición de los botones



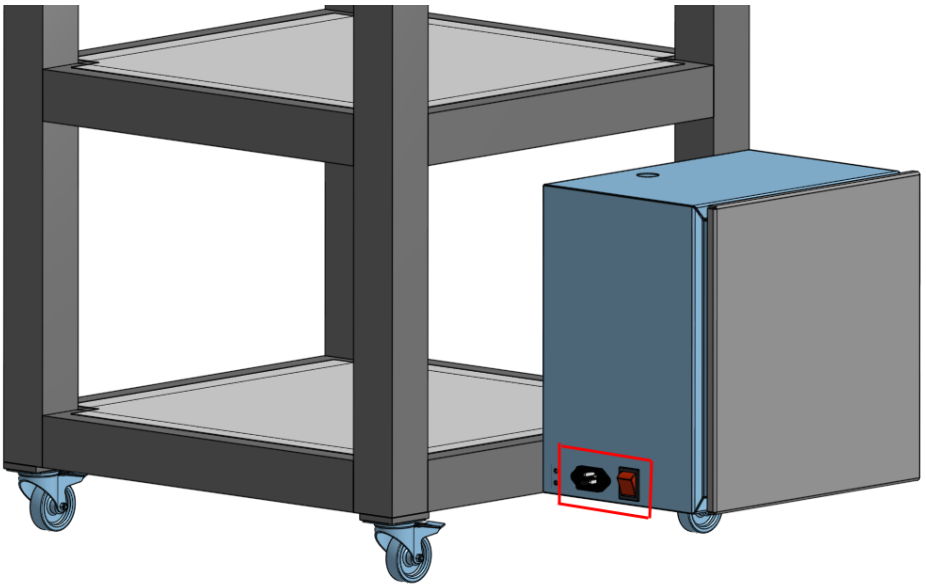

## C.2. Encendido y puesta en marcha

1. Asegurarse de la conexión del cableado interno de los pines del tablero de control y de la caja de operación (GUI).

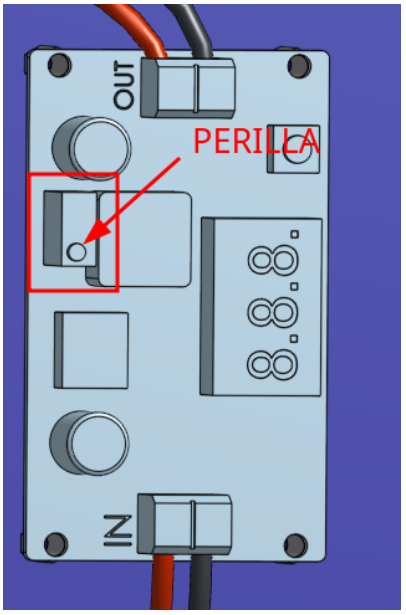


2. Asegurarse de la integridad de los fusibles de control y potencia de 2A y 10A respectivamente. Estos se encuentran en la GUI.

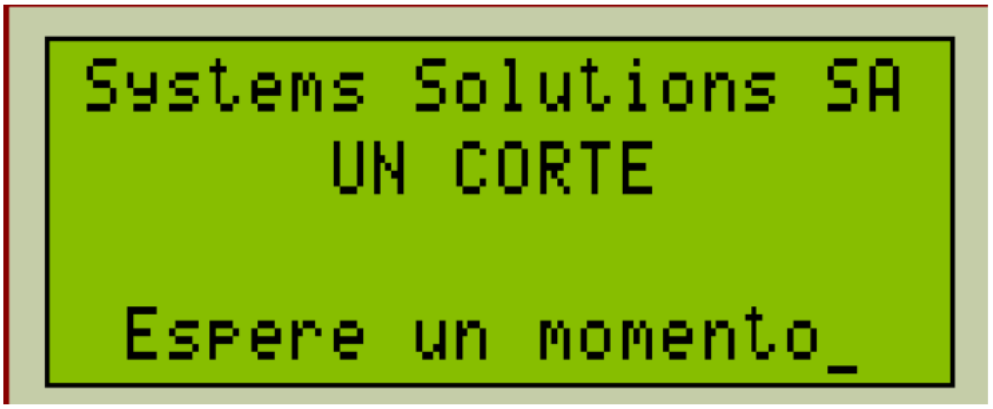
3. Conectar el cable de poder entre la fuente de energía y el tablero de control. Encender el switch principal del tablero de control.



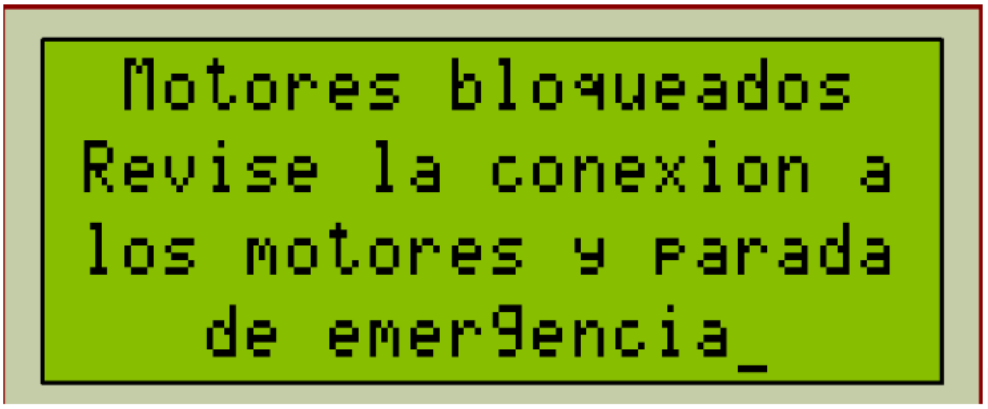
4. Verificar que el conversor DC esté en un valor cercano a 5V. De no estar en este valor, girar con un destornillador la perilla del conversor vista en pantalla.



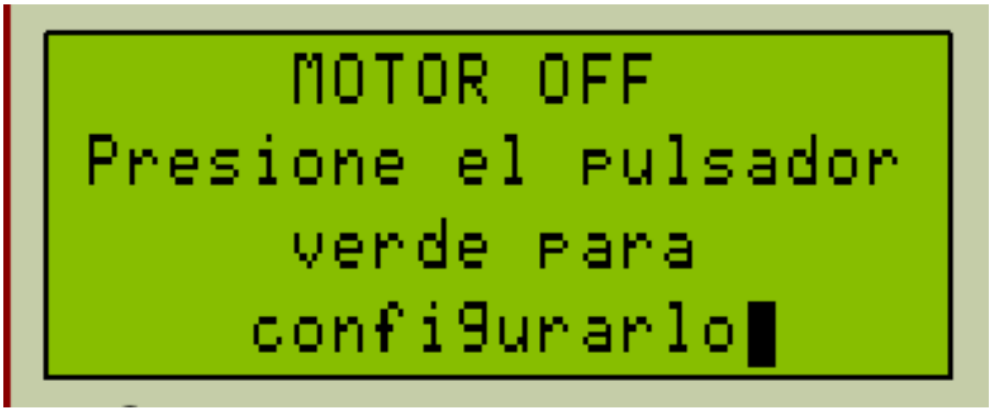

5. El valor se verá reflejado en el display 7seg del componente. Encender el switch de alimentación del sistema de Control. El display debe mostrar el siguiente mensaje:



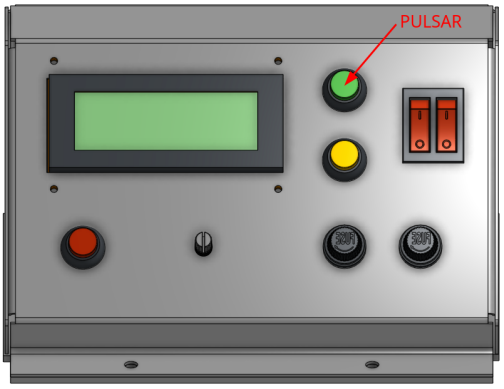

6. Esperar a que el display inicie y muestre el siguiente mensaje:



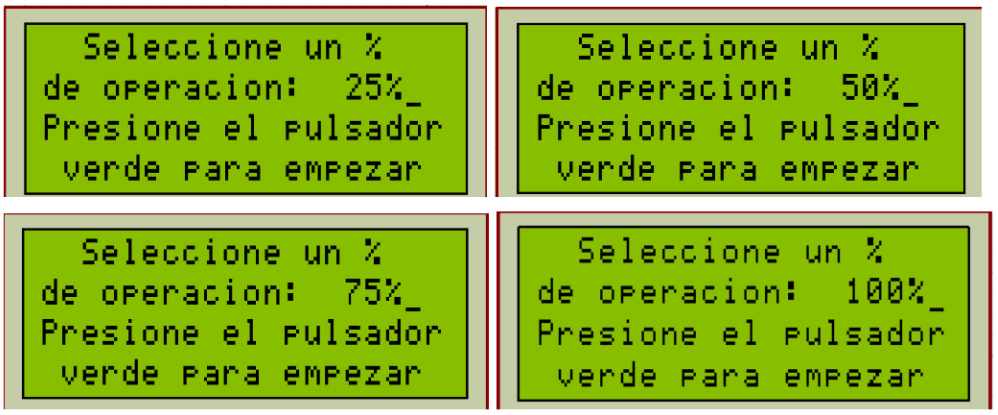

7. Encender el switch de control del motor. Y desbloquear la parada de emergencia en caso de estar prendida. El display debería mostrar el siguiente mensaje:



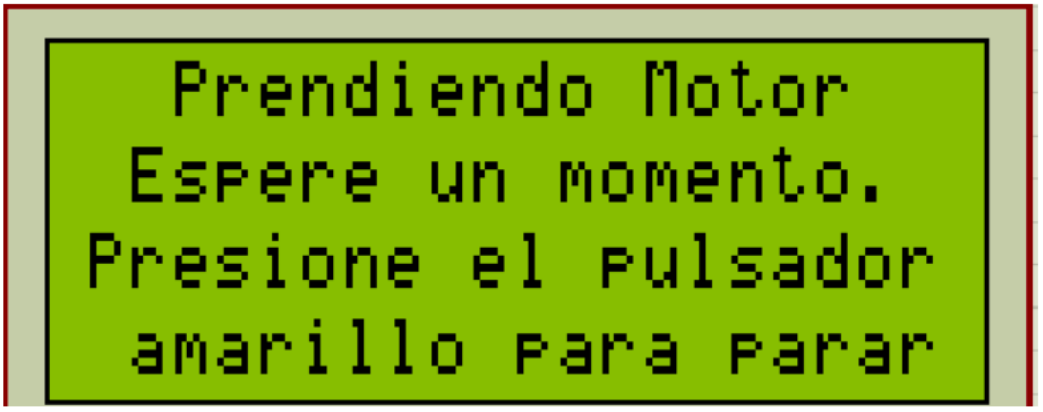

8. Encender el sistema de control del motor pulsando el botón verde de la GUI.



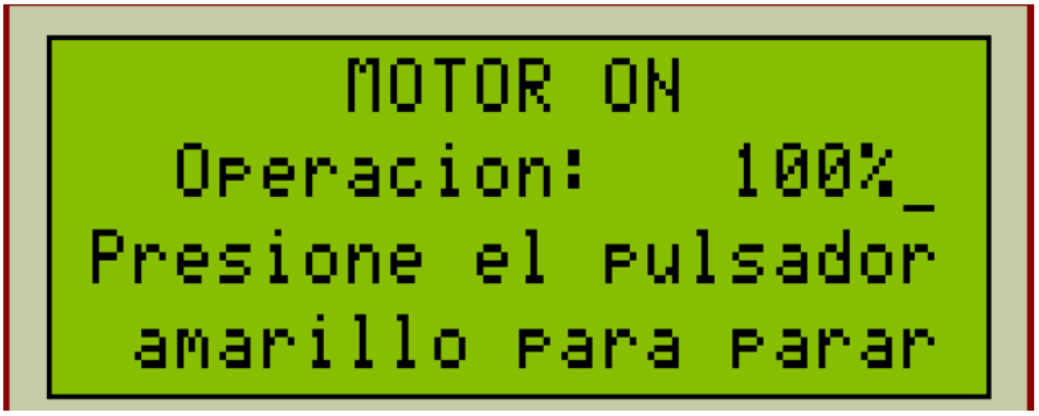

9. Cambiar el punto de operación del motor girando la perilla que se encuentra en la GUI. El display va a mostrar un valor entre 0 % y 100 % con base a la posición de la perilla. Se tiene la siguiente tabla de referencia de valores de porcentaje para funcionamiento.



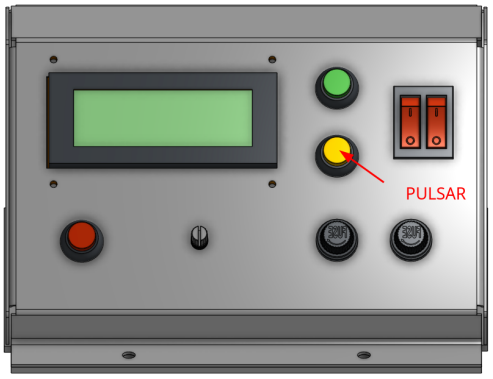

10. Encender el motor pulsando el botón verde de la GUI. Esperar 5 segundos mientras se prende el motor de manera suave. El display debería mostrar lo siguiente:



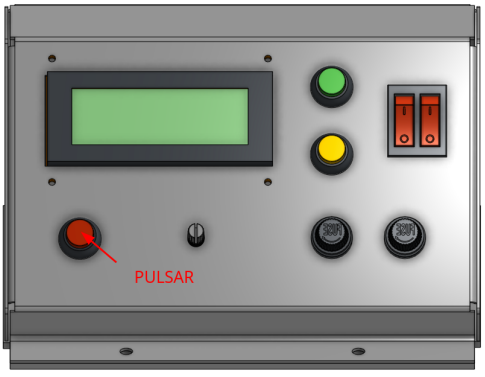

11. El motor debe haber llegado a su estado estable con punto de operación establecido. El display debe mostrar lo siguiente:




12. Para detener el motor, presione el botón amarillo para RESET/STOP, generando un freno suave del motor. El display debe de volver a la etapa MOTOR OFF y mostrar el siguiente mensaje:




13. Para detener el sistema mediante una PARADA DE EMERGENCIA se debe presionar el pulsador autobloqueante rojo o apagar el switch de control del motor. Esto genera un freno abrupto del sistema, por lo que solo se recomienda en casos de emergencia.

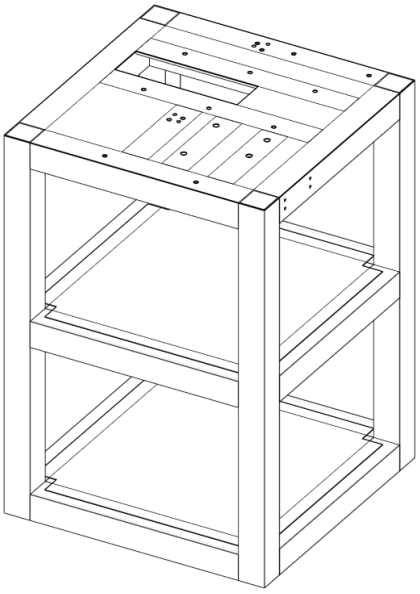



14. Si se detuvo mediante RESET/STOP, se devuelve al mensaje del final del paso 8.
15. Si se detuvo mediante parada de emergencia, se devuelve al inicio del paso 8.

# D. Manual de Montaje

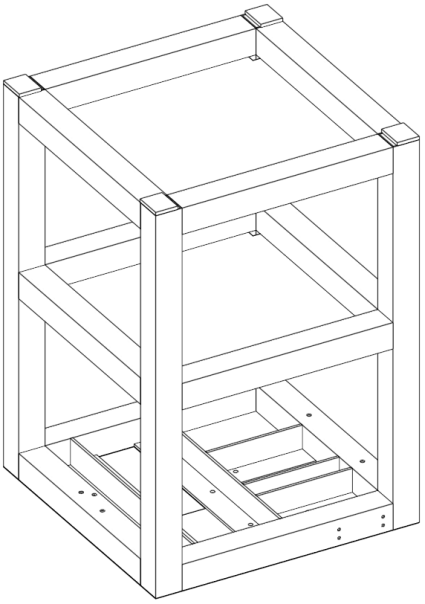
## D.1. Preparación

Para comenzar se tiene la estructura, esta se debe posicionar de forma tal que resulte fácil trabajar sobre ella.

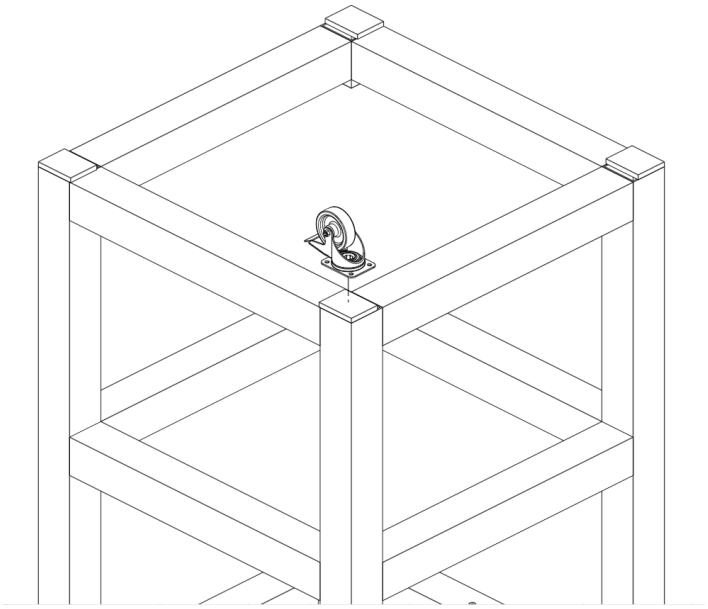


## D.2. Posicionamiento y ensamble de ruedas

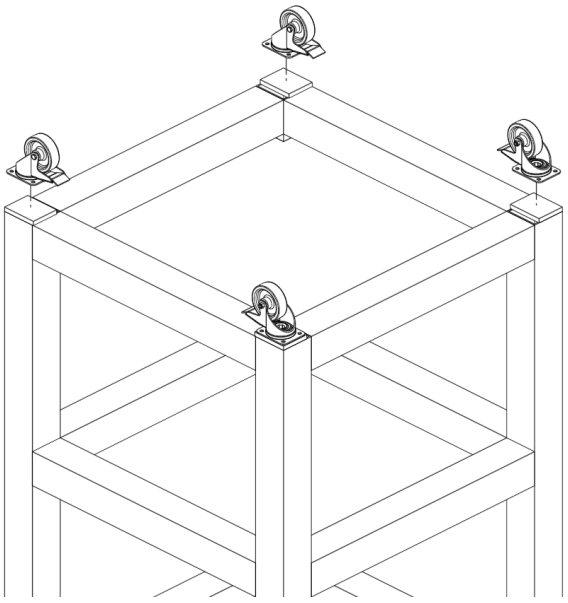
Para este paso es necesario girar $180°$ la estructura y así poder instalar las ruedas.



Una vez dispuesta de esta forma, tomar una de las ruedas y posicionarla de siguiente manera:

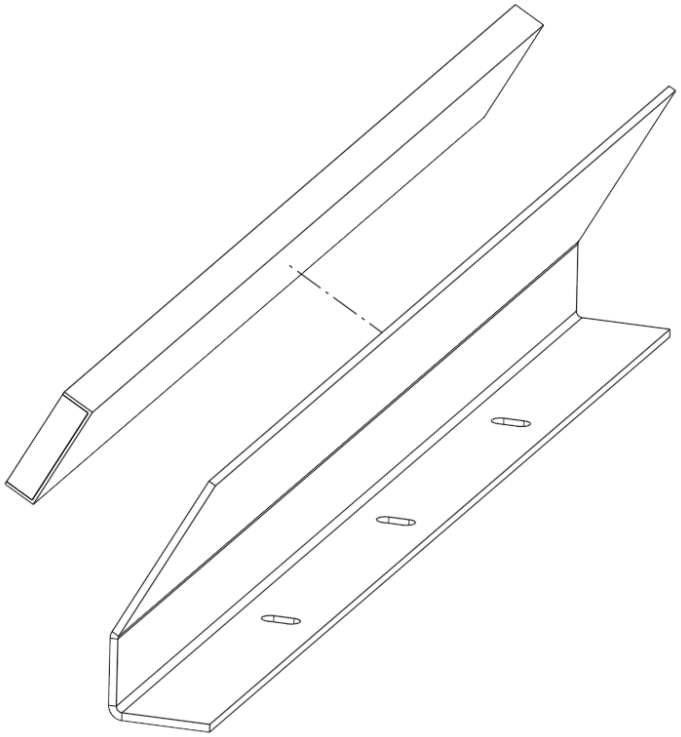


En este punto se atornilla la rueda mediante tornillos autoperforantes sobre la lámina. Este proceso se repite para cada una de las cuatro ruedas. El resultado final se debe ver de la siguiente forma:



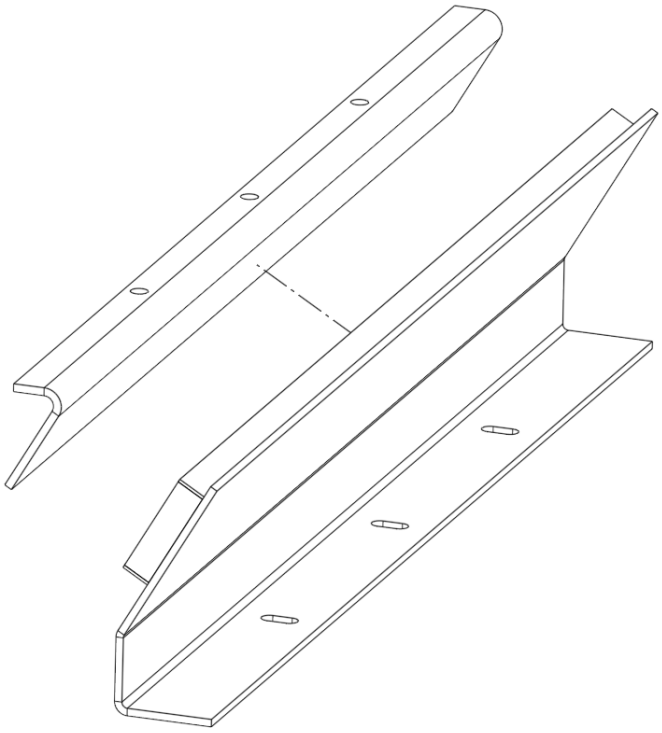
## D.3. Atornillar parte fija de los rieles a las bases en Y

En este paso se ensamblan las partes correspondientes al cajón de corte de los bananos; específicamente las correderas con sus respectivos soportes. Para comenzar se atornilla la parte fija del riel con el soporte en Y.

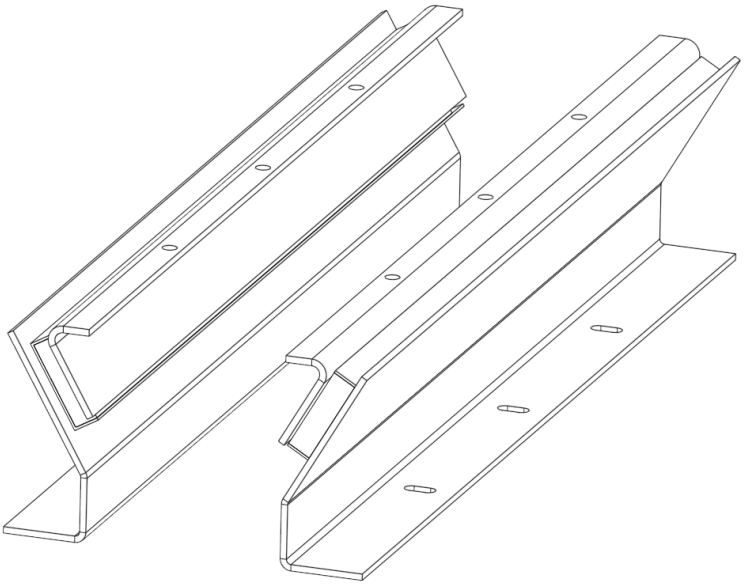


## D.4. Atornillar parte móvil de rieles a placas intermedias

Ahora, se atornilla la parte móvil del riel con la placa intermedia mostrada en la figura.

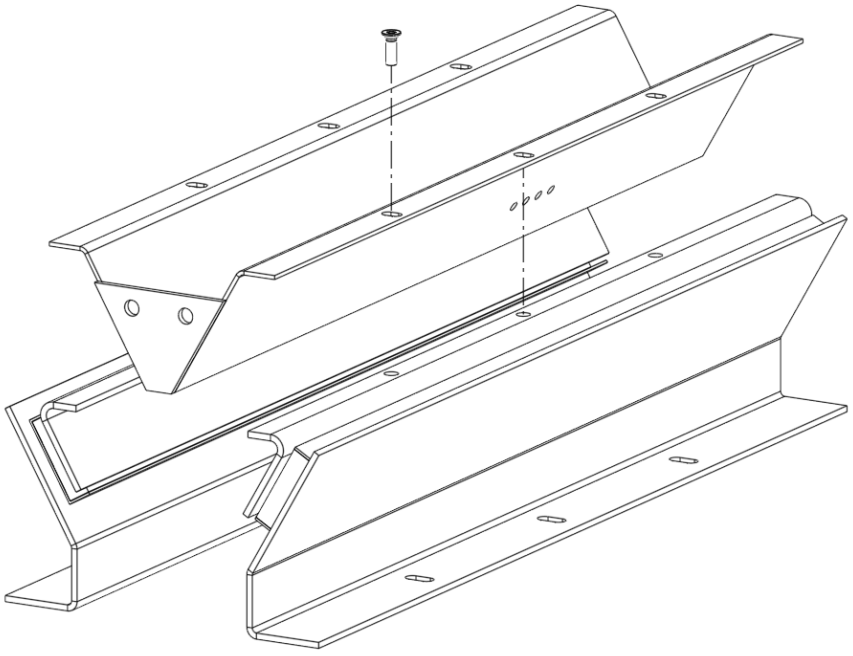


Una vez se termina este paso, se deben repetir los pasos de ensamble para la pieza opuesta con el fin de obtener las dos piezas de soporte, como se evidencia en la siguiente figura:



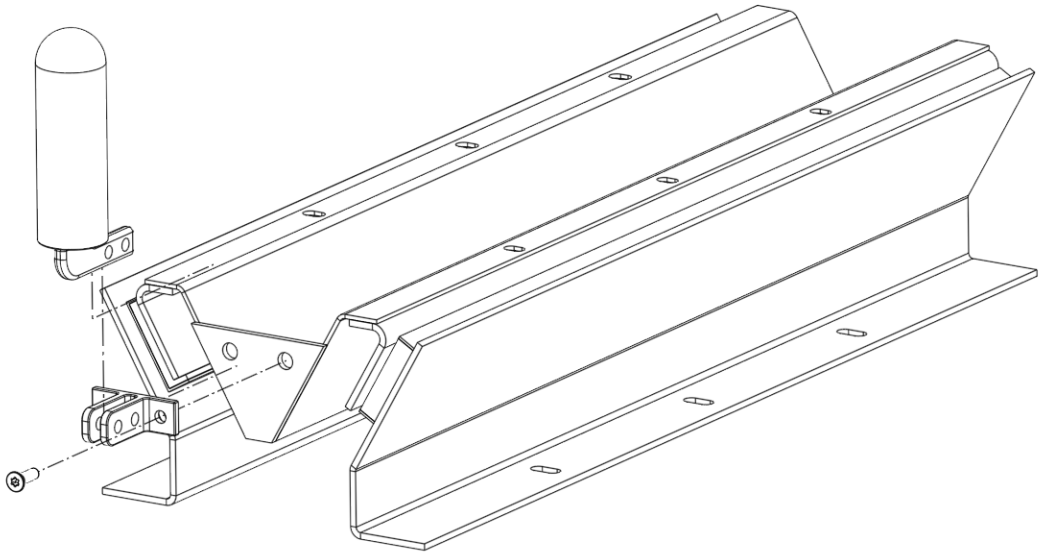
## D.5. Atornillar placas intermedias (con rieles móviles) al cajón (placas de contacto que vienen soldadas)

Una vez se tiene el ensamble de los soportes con sus respectivas correderas, se monta ahora el cajón. Este se atornilla teniendo en cuenta los agujeros de las placas intermedias.



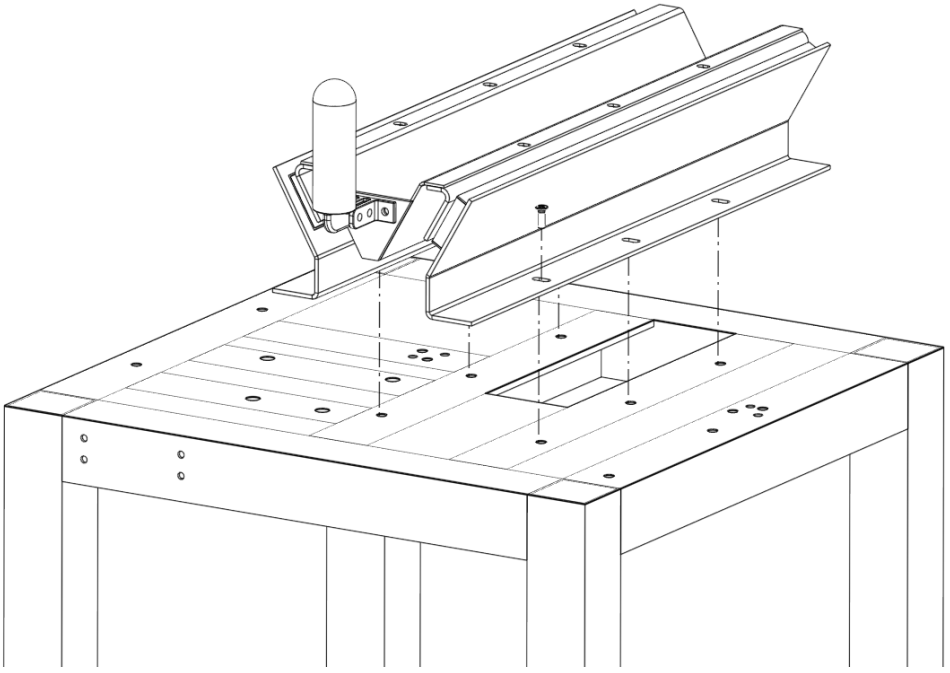
## D.6. Colocar manija al cajón

Ahora, se ensambla la manija al cajón. Esta se atornilla teniendo en cuenta los agujeros dispuestos para su ensamble.

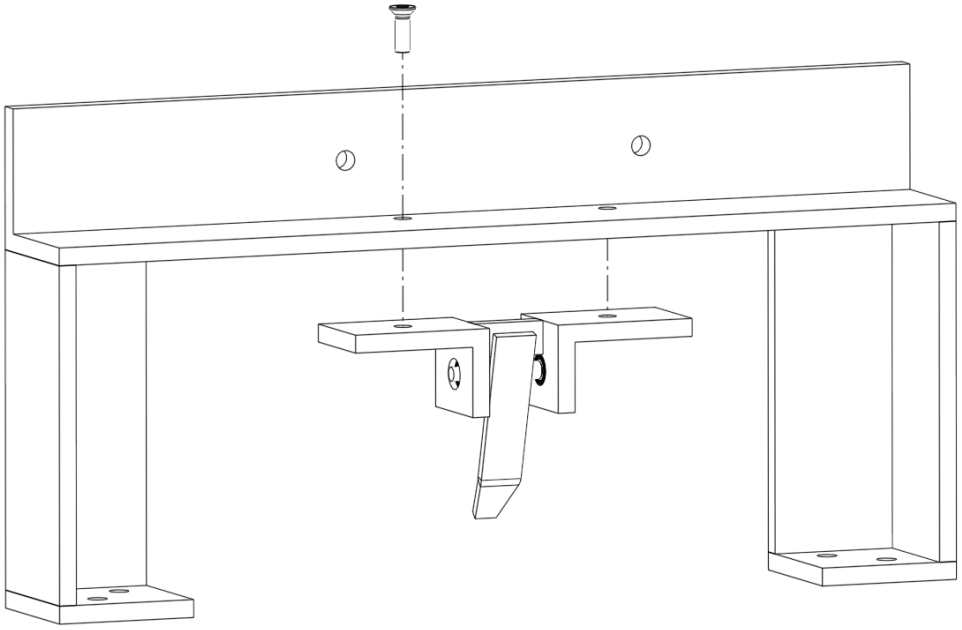


## D.7. Ubicar y atornillar estructura compuerta de salida a la mesa

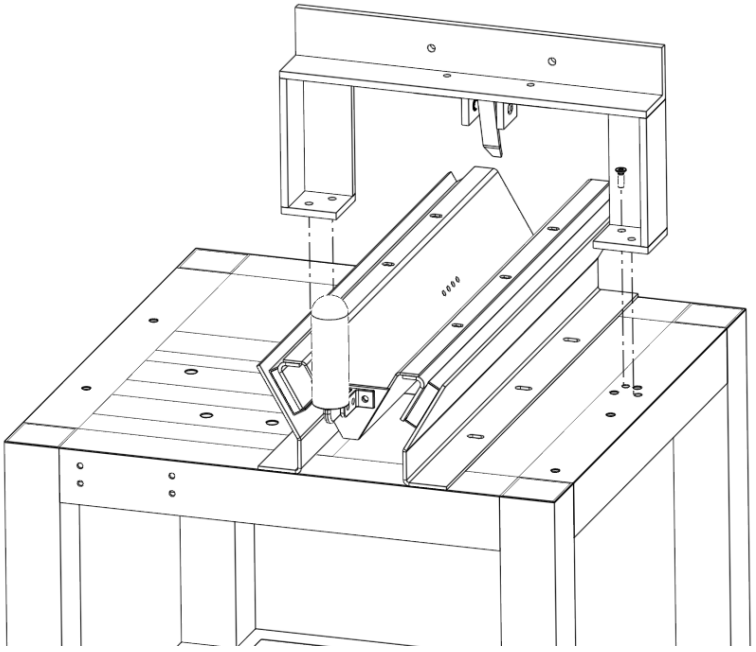
Con las ruedas en su lugar, se posiciona la estructura de forma tal que quede apoyada sobre ellas. Una vez se ha ensamblado el subsistema de transporte, se procede a montar este sobre la estructura teniendo especial cuidado con que quede alineado. A continuación, se atornillan la base en Y a la estructura como se muestra a continuación:



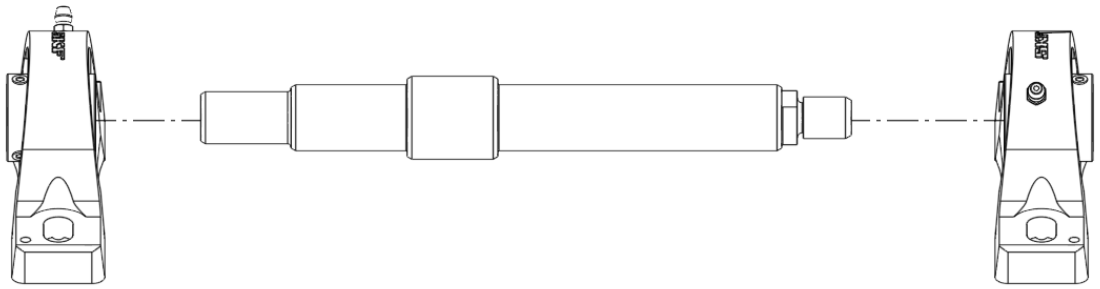
## D.8. Ensamblar compuerta con los dos soportes en L y atornillarlos a la estructura compuerta



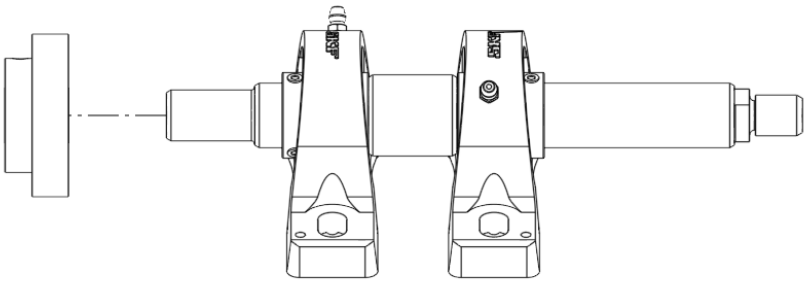
Una vez montada la compuerta sobre el soporte, se procede a atornillar esta sobre la estructura principal.



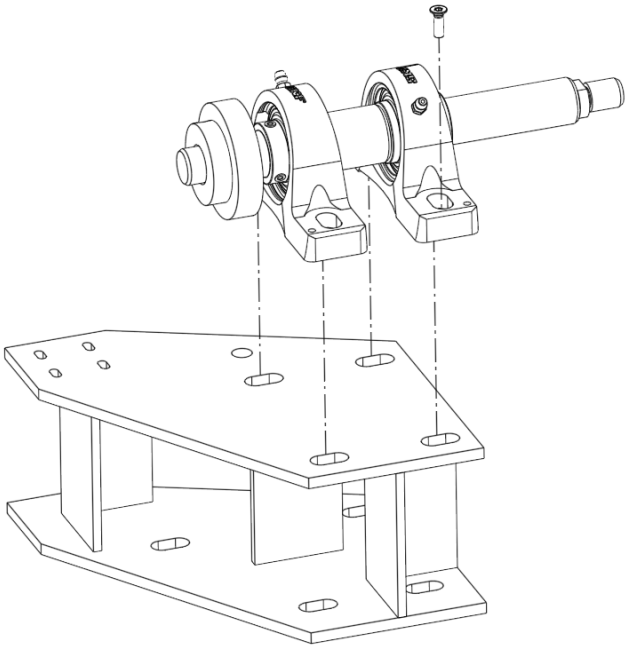
## D.9. Montar chumaceras en el eje



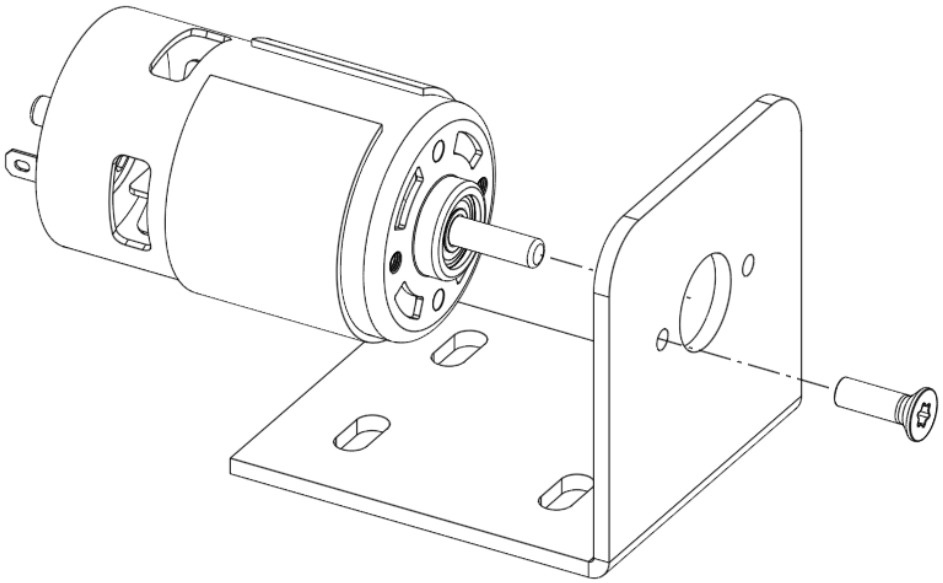
## D.10. Montar polea mayor en eje



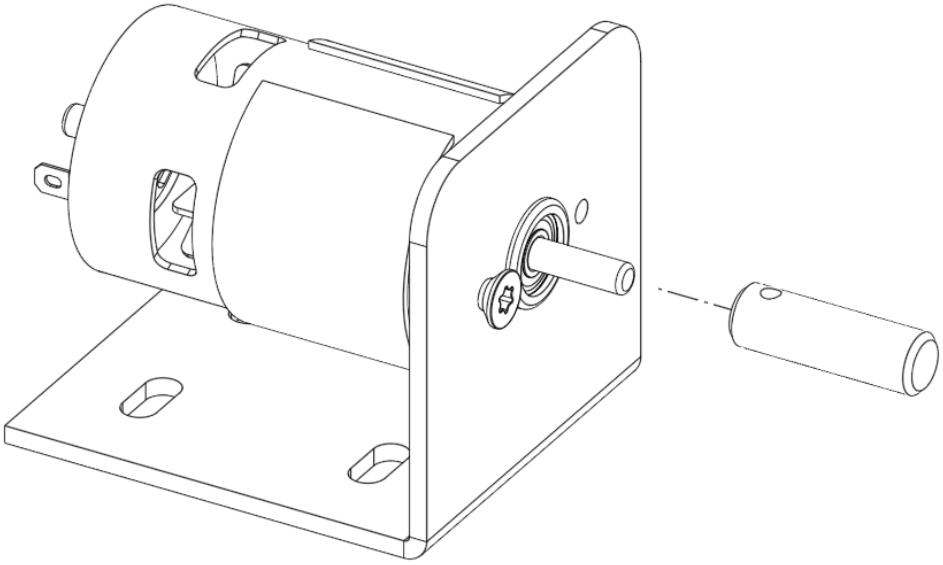
## D.11. Atornillar chumaceras preliminarmente a estructura motor



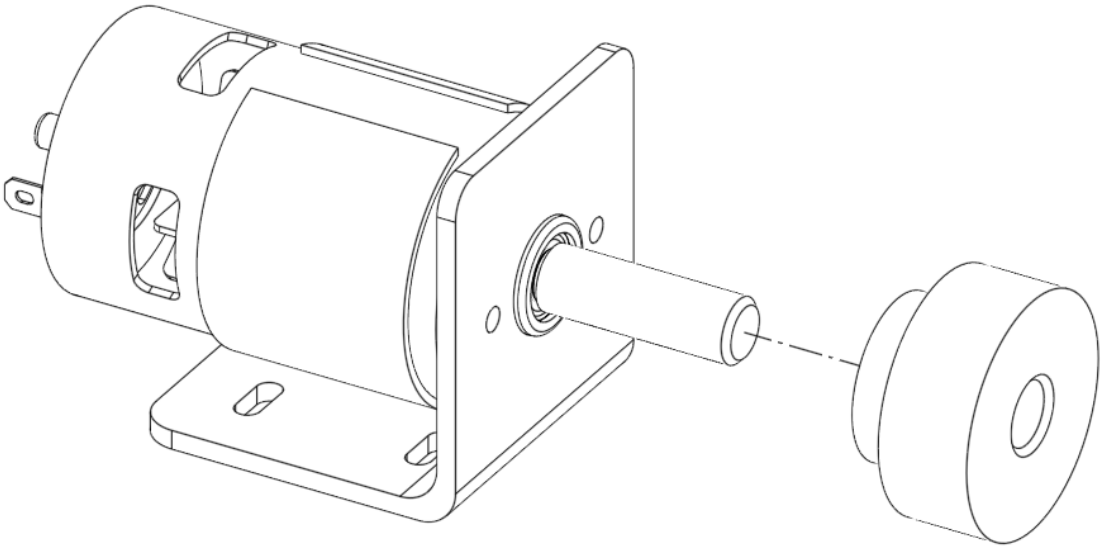
## D.12. Montar motor en el soporte motor



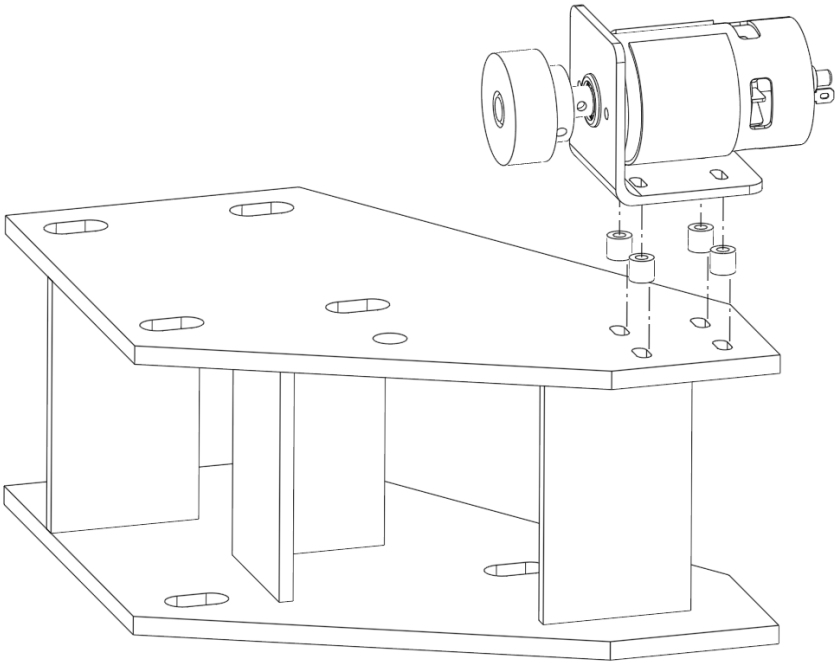
## D.13. Colocar acople al eje del motor



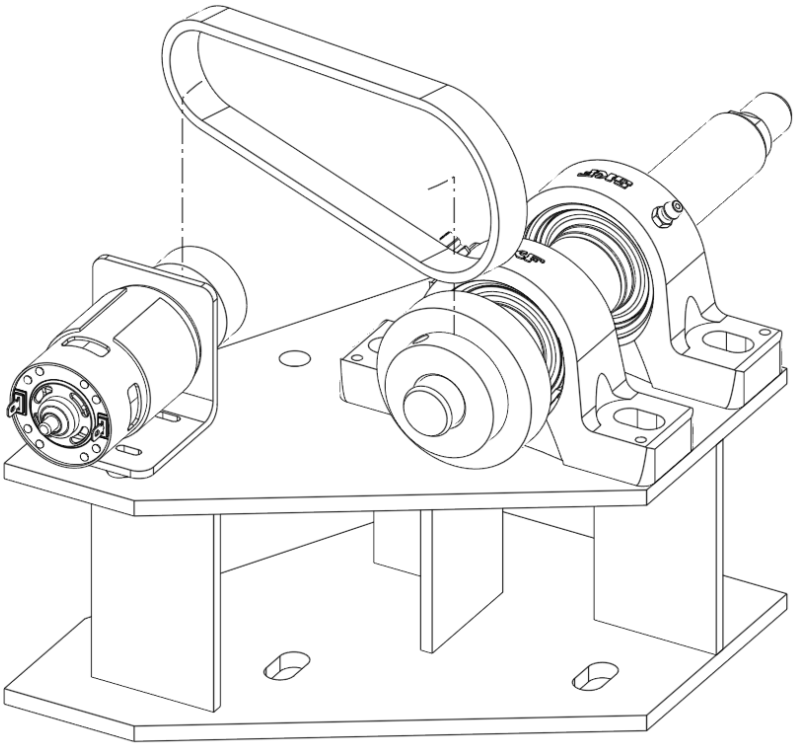
## D.14. Montar polea menor en acople motor



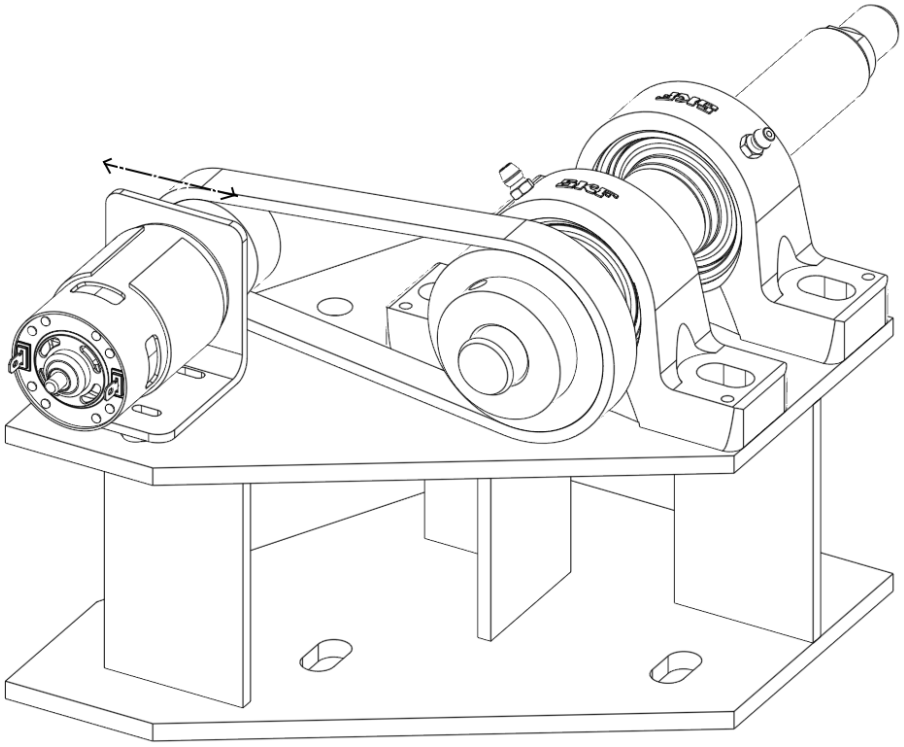
## D.15. Montar empaques de amortiguamiento y colocar soporte motor en estructura motor



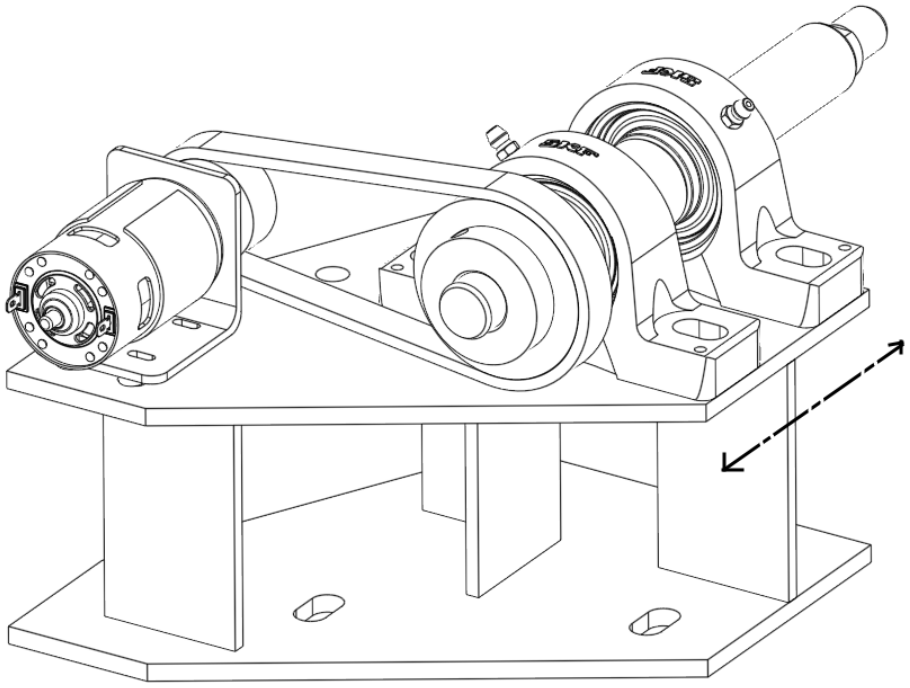
## D.16. Montar correa de transmisión entre las poleas



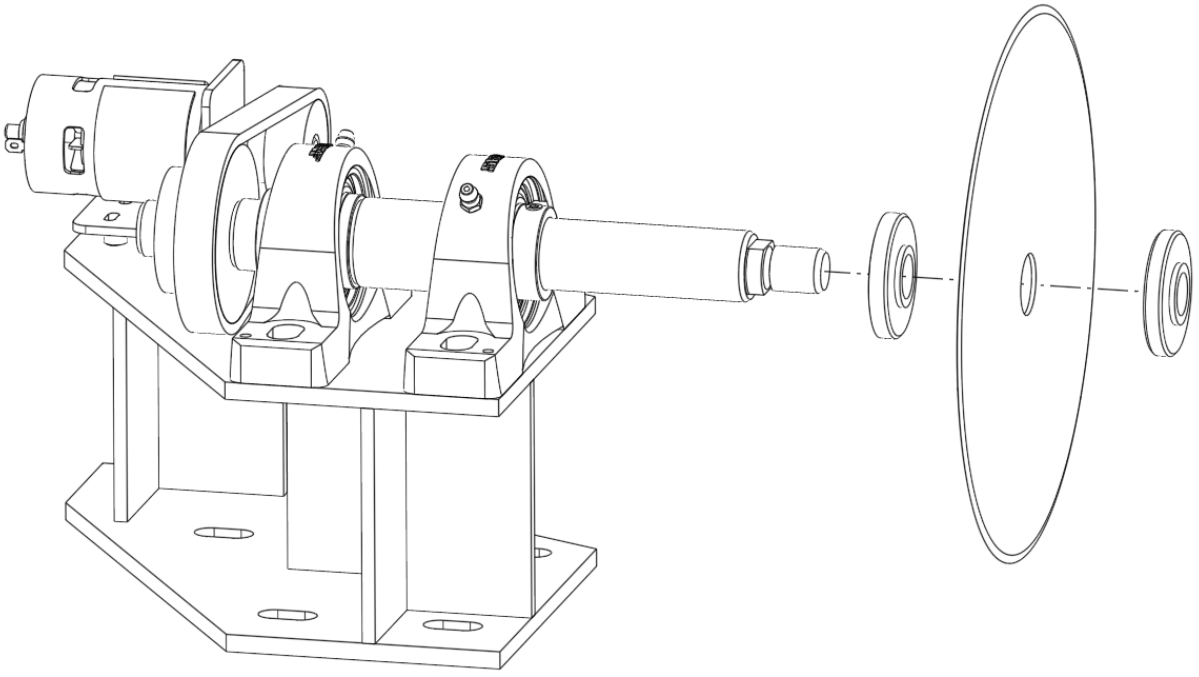
## D.17. Atornillar soporte motor realizando un templado de correa preliminar



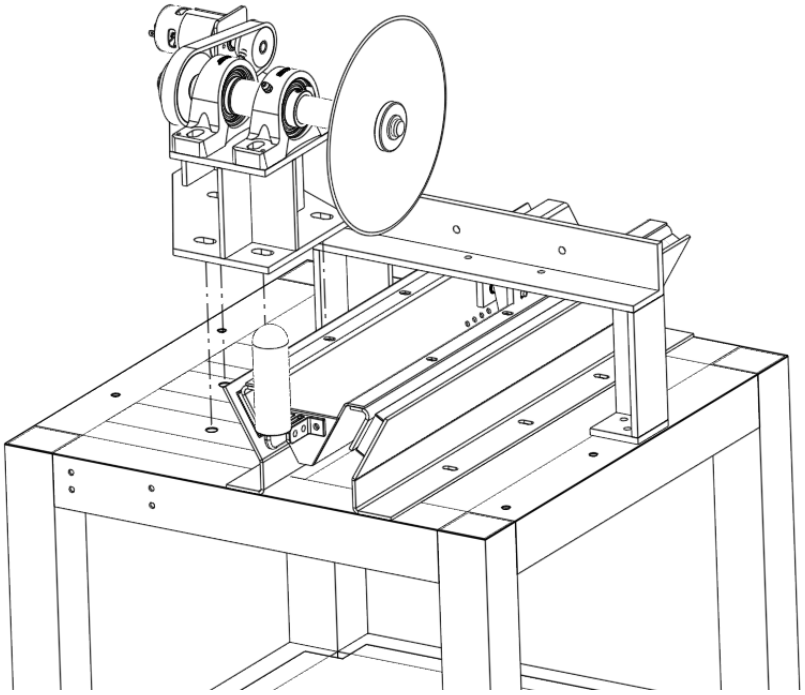
## D.18. Ajustar posición de chumaceras hasta que la correa quede centrada en las poleas y apretar



## D.19. Montar y ajustar provisionalmente cuchilla en el eje

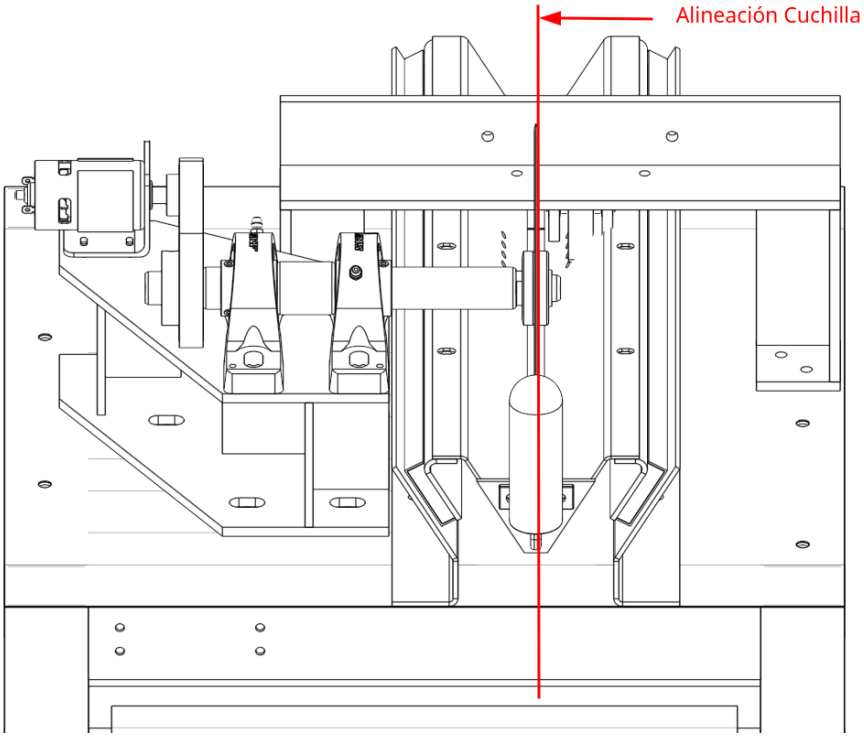


## D.20. Montaje estructura motor sobre estructura principal

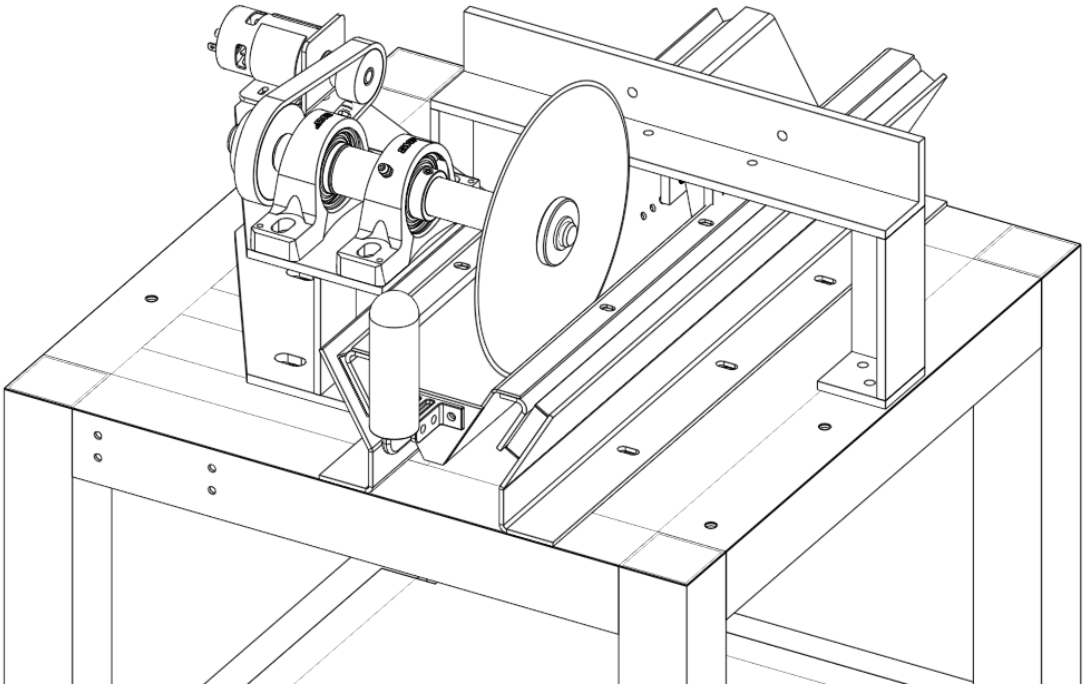


## D.21. Verificar centrado de cuchilla respecto al cajón (mover estructura motor hasta encontrar la correcta alineación y apretar)

La cuchilla debe quedar alineada como se muestra en la figura, esto con el fin de que el corte del banano sea justo por la mitad.

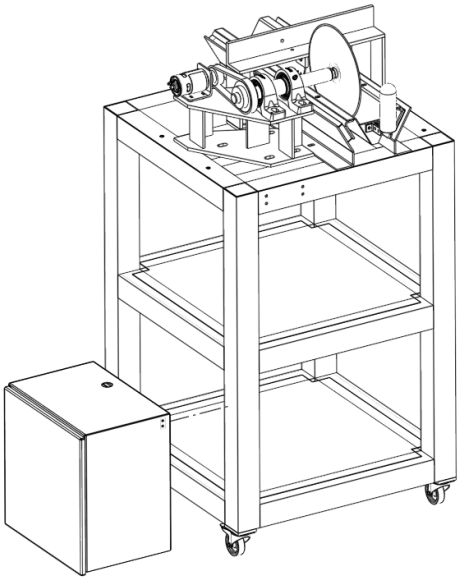


Una vez alineada la cuchilla, el ensamble debe verse de la siguiente manera:



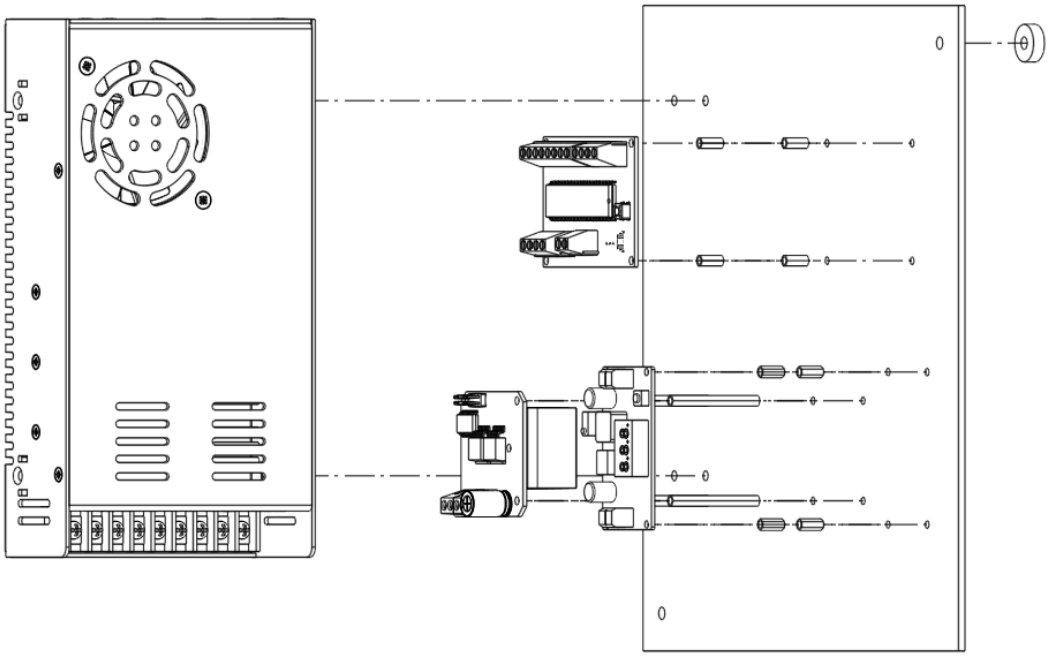
## D.22. Montar y atornillar tablero de control

Se monta sobre la estructura con los tornillos autoperforantes.

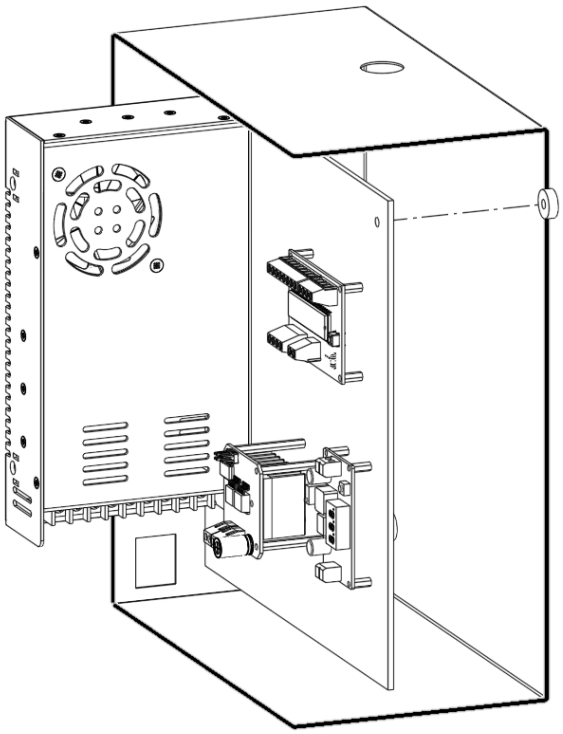


## D.23. Ensamble tablero de control

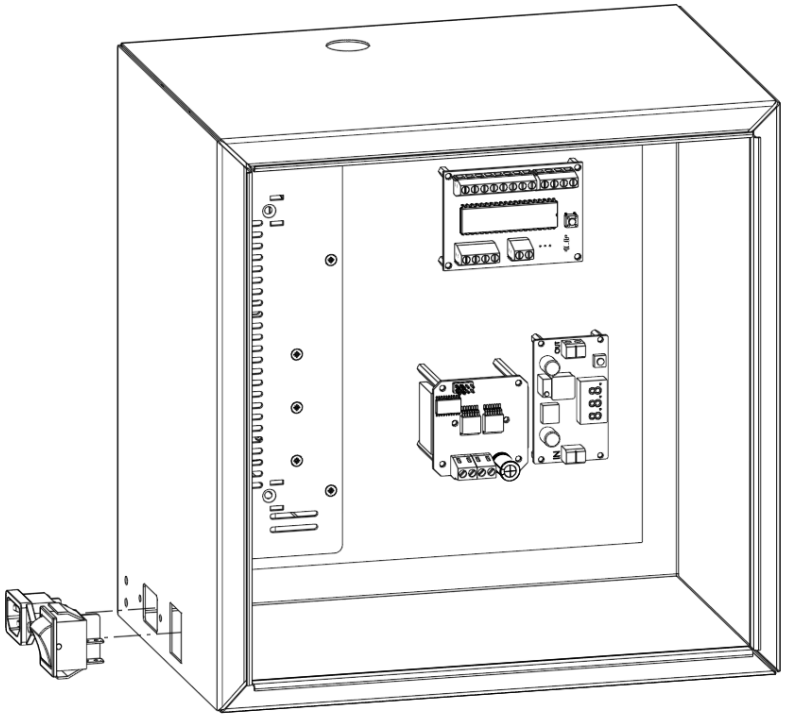
En este paso se montan los componentes en la caja de control. Se inicia por montar los componentes en la placa como se muestra en la siguiente imagen:



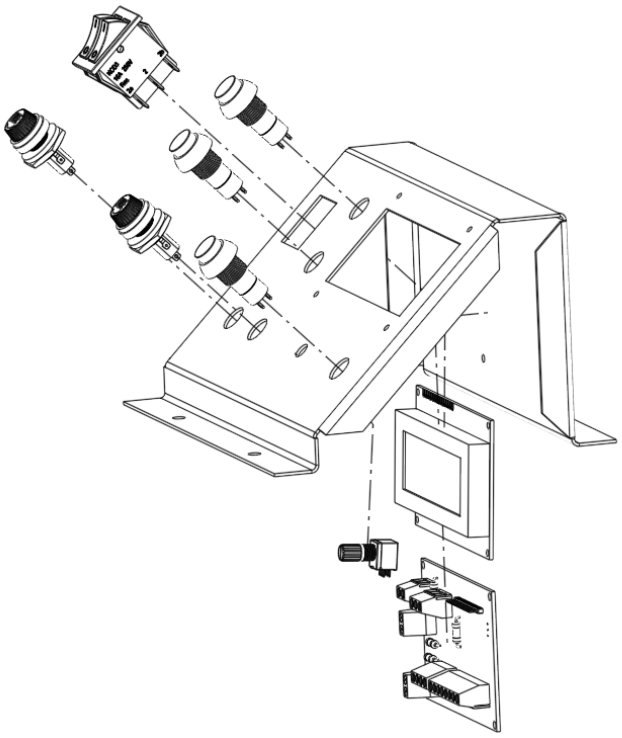
Ahora se instala la placa dentro de la caja de paso.



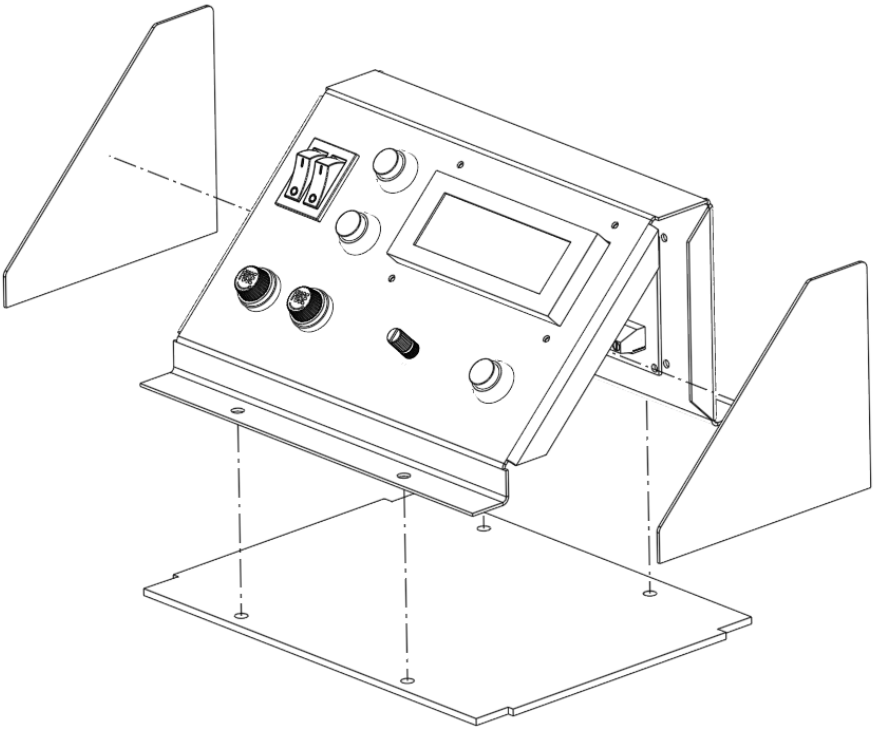
Por último, se instala el switch y el conector hembra en la caja.



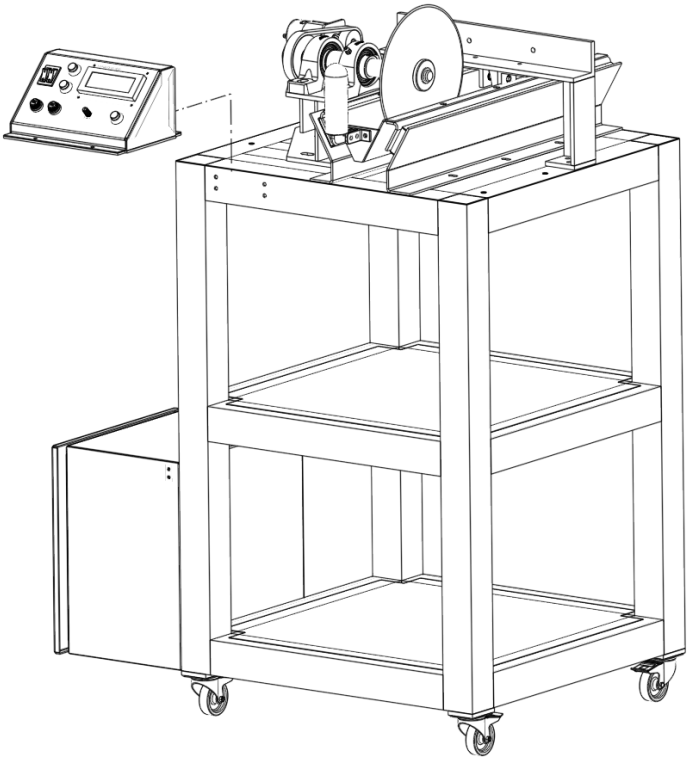
## D.24. Ensamble componentes tablero de Botones



## D.25. Ensamble laterales tablero de Botones

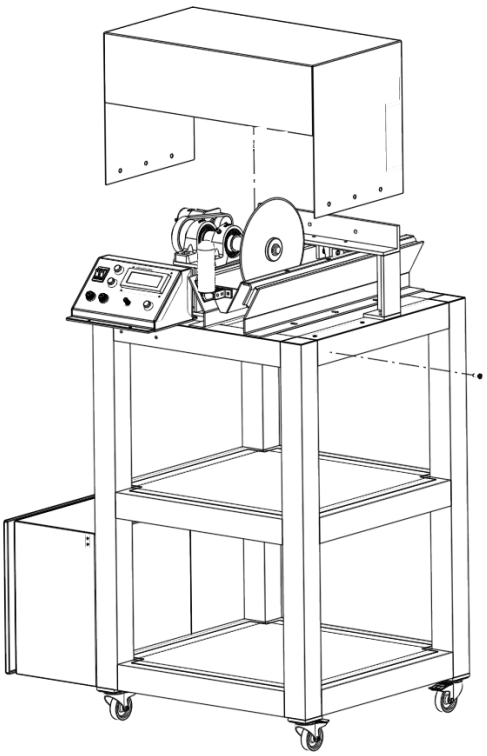
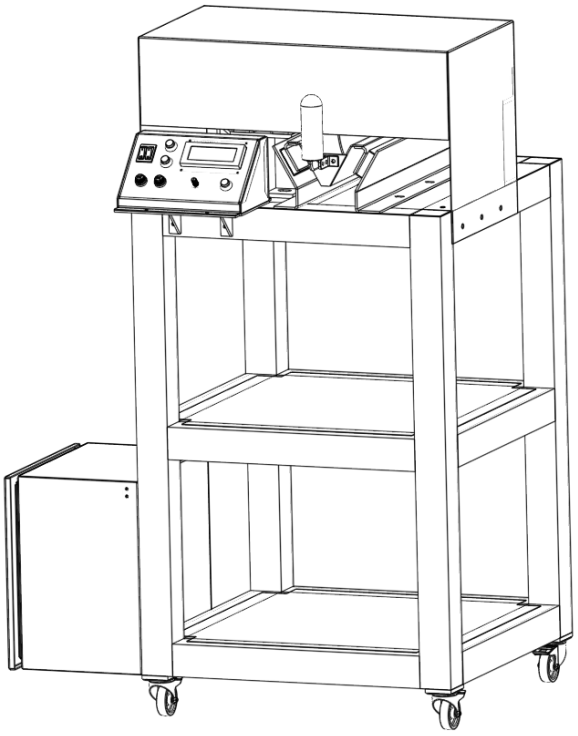


## D.26. Montaje tablero de Botones



## D.27. Montaje carcasa

El último paso consiste en montar la carcasa que cubre la cuchilla y el motor. La máquina queda como se evidencia a continuación:



El resultado final se muestra a continuación: