

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:
INGENIERO EN MECATRÓNICA**

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA REBORDEADORA PARA INCREMENTAR LA EFICIENCIA EN LA PRODUCCIÓN CON NIVELES DE PRESTACIÓN (PL) EN FUNCIÓN DE SEGURIDAD PARA BANDEJAS PANERAS DE ALUMINIO FABRICADAS POR LA EMPRESA TEL-GAR.”

AUTORES: ÁLVARO FELIPE NOBOA MONTALVO

SANTIAGO JAVIER FUENTES RÍOS

DIRECTOR: ING. HÉCTOR COCHISE TERÁN HERRERA

Latacunga, 2023





CONTENIDO

- 1.- Descripción del proyecto
- 2.- Necesidades del sistema de mezclado
- 3.-Diseño mecánico, eléctrico y de programación.
- 4.-Construcción
- 5.-Pruebas y resultados
- 6.-Conclusiones y recomendaciones

Planteamiento del problema

La empresa Telgar a lo largo de trayectoria ha venido trabajando en la producción de elementos hechos principalmente de aluminio, entre estos elementos se encuentran las bandejas paneras de aluminio destinadas a los fabricantes de hornos y panaderías en general (Grupo Telgar, 2015). La demanda de las bandejas en los últimos años se ha ido incrementando hasta llegar a una producción de alrededor de unas 3000 bandejas mensuales.

Para la producción de estas bandejas rectangulares, es necesario realizar un borde en todo el perímetro de esta, proceso que actualmente se lo realiza a mano, con la ayuda de un cincel y un martillo para golpear el borde, lo que conlleva que todo el personal involucrado tenga que dedicarse al menos por una semana a este único trabajo durante todo el día y, así, poder cumplir con la meta mensual. Esto produce varios problemas como:

- Fallas en la finalización del doblado de la bandeja
- Cansancio en el personal y baja en la producción



Objetivo general

Diseñar y construir de una máquina rebordeadora para incrementar la eficiencia en la producción con niveles de prestación (PL) en función de seguridad para bandejas paneras de aluminio fabricadas por la empresa Tel-Gar.



Objetivos específicos

- Recopilar información bibliográfica sobre los diversos tipos de máquinas dobladores y los sistemas mecánicos, electrónicos y de control que utilizan.
- Seleccionar los materiales y actuadores a utilizar para el funcionamiento completo de la máquina.
- Diseñar el sistema mecánico que sea capaz de albergar todos los componentes mecánicos, electrónicos y de control a ser utilizados
- Implementar la electrónica de control a los sistemas mecánicos, así como los sensores necesarios para realizar el control de seguridad para el uso del equipo.
- Crear el sistema de control que permita tener un movimiento combinado de los sistemas mecánicos para lograr el doblado en el borde de las bandejas
- Seleccionar los niveles de prestación (PL) en función de seguridad adecuados para el sistema de seguridad de la máquina.
- Comprobar el aumento de la producción mediante la comparación de unidades producidas al día antes y después de la instalación de la máquina.



Justificación

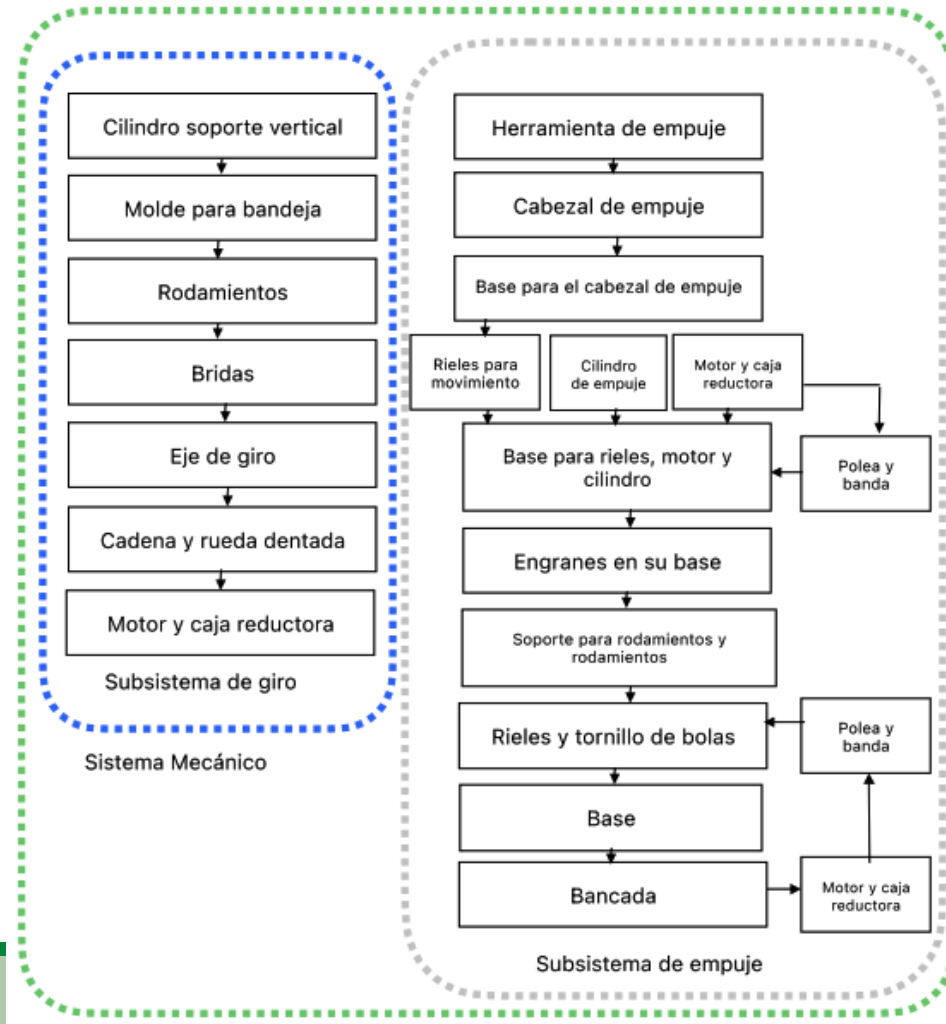
En la empresa Tel-Gar actualmente el proceso de doblado de bordes de bandejas de aluminio, se lo realiza de manera manual, con un golpeteo continuo, lo que demanda una gran cantidad de tiempo y de esfuerzo por parte de los empleados, quienes se dedican durante días a esta labor para poder cumplir con la producción a tiempo. El hecho de realizar el doblado de bordes de forma manual implica que el cometimiento de errores sea más frecuente conforme pasa el tiempo por lo que la eficiencia en la producción de la empresa se reduce. La máquina dobladora de bordes de bandejas de aluminio, plantea la reducción del personal necesario a una sola persona, que será el operario de la máquina, con la finalidad de aprovecharlo en otras áreas de la producción.

La máquina beneficiará a los empleados ya que será posible evitar procesos repetitivos logrando un diseño compacto, además, tomará en cuenta medidas de seguridad a nivel usuario con principios de protección laboral y de seguridad de máquinas orientados a los niveles de prestación (PL) de una función de seguridad.

Necesidades del sistema

Características de la máquina	Importancia	Necesidades de la empresa					
		Sistema de seguridad pasiva	Utilización de componentes estándar	Sistema de doblez especializado con dados específicamente diseñados	Sistema de giro controlado de la bandeja	Control de fuerza aplicada durante el proceso	Sistema de lubricación automática
que sea segura	4	5	3	3	3	3	3
que sea fácil de mantener	3	0	5	1	0	0	5
que sea ergonómica	2	0	1	0	0	0	0
que realice el doblez del aluminio	5	0	1	5	5	5	1
que el doblez quede bien sellado	4	0	1	5	3	5	1
que el acabado no tenga imperfecciones	3	0	1	5	3	5	0
que se lubrique constantemente	3	0	1	0	0	0	5
Dificultad		2	2	5	3	4	2
Resultados del como		20	44	75	58	72	51
Ponderación absoluta		40	88	375	174	288	102
Poderación relativa		3,75	8,25	35,15	16,31	26,99	9,56
orden de importancia		6	5	1	3	2	4

Diagrama de bloques del sistema mecánico

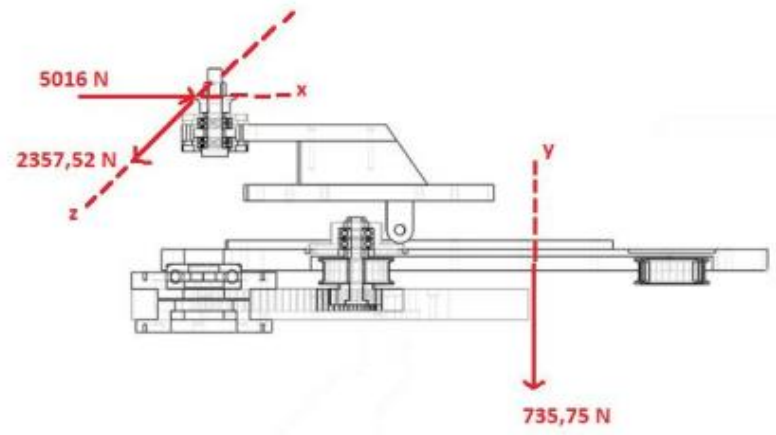


Fuerzas del sistema

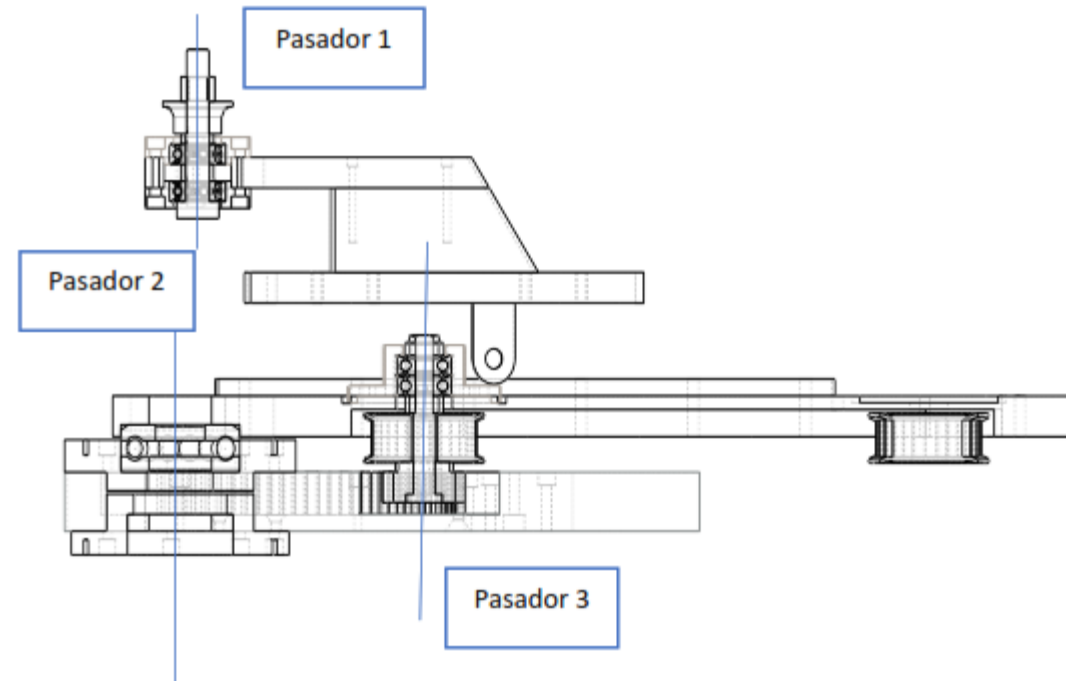
Existen dos fuerzas principales involucradas en el proceso de doblado del borde de las bandejas de aluminio.

- Fuerza de empuje
- Fuerza de rozamiento entre la bandeja y la herramienta.

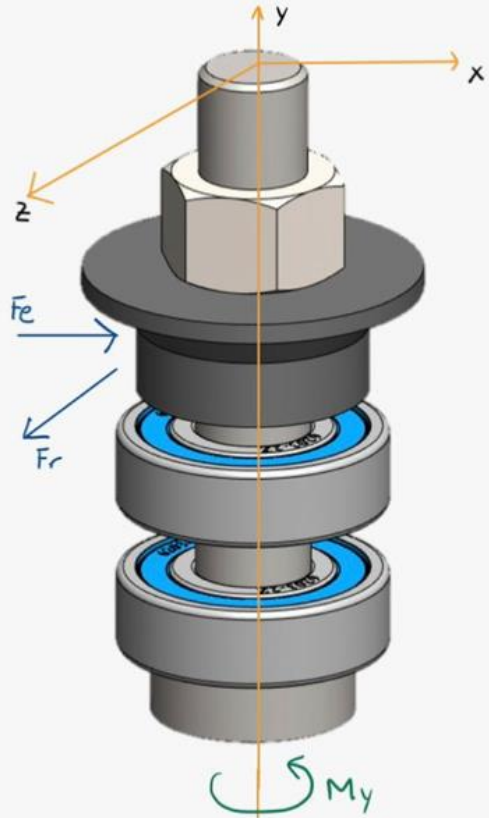
Por otro lado, existe una fuerza relacionada con el peso del carro de empuje



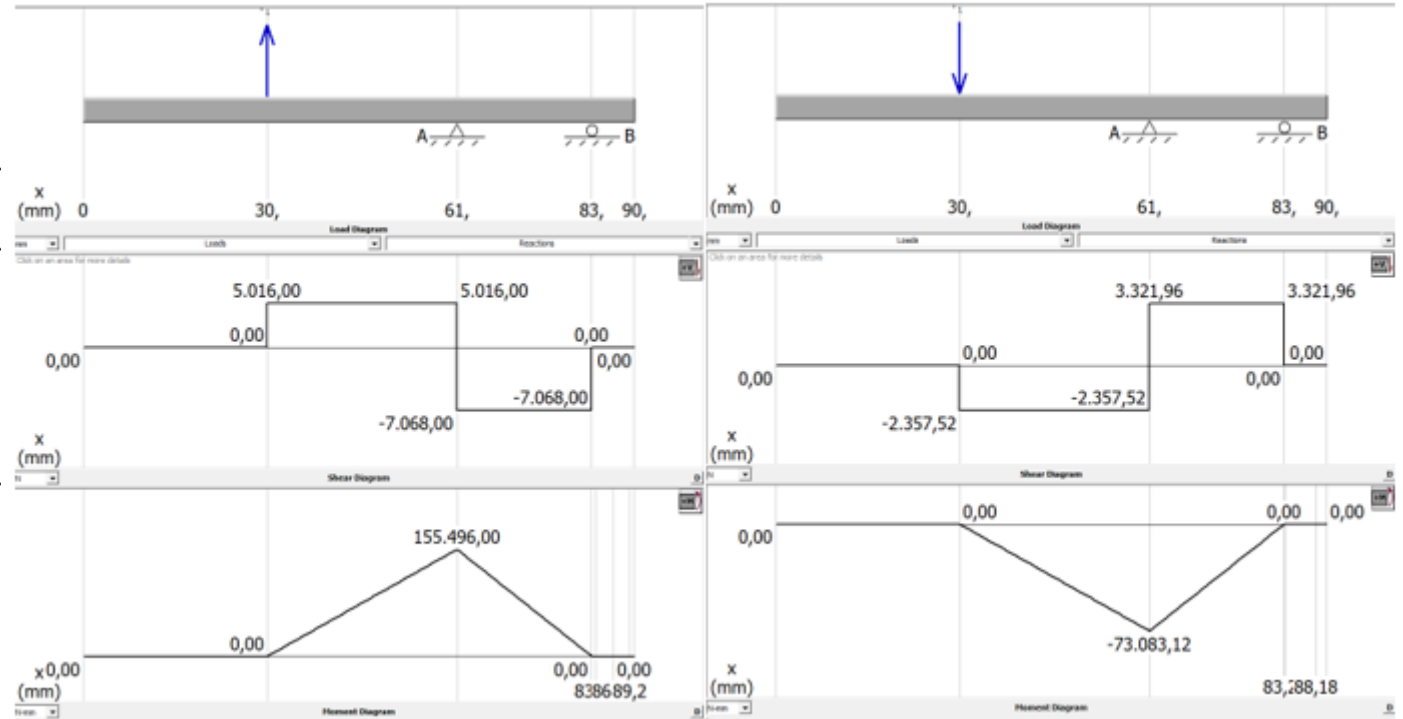
Diseño de pasadores



Pasador 1



Dato	Valor
F_e	5016 N
F_r	2357,52 N
M_y	58938 Nmm



Pasador 1

$$d = \left(\frac{16N}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(Ma)^2]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} [3(Tm)^2]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{1/3}$$

$$d = \left(\frac{16(6)}{\pi} \left\{ \frac{1}{183.486} [4(171814.285)^2]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{655} [3(58938)^2]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{1/3}$$

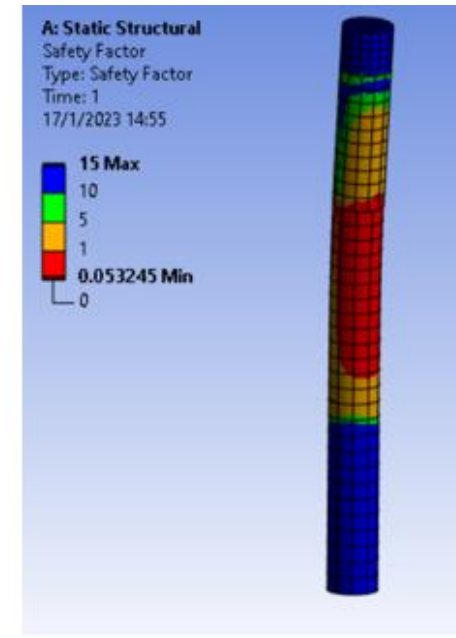
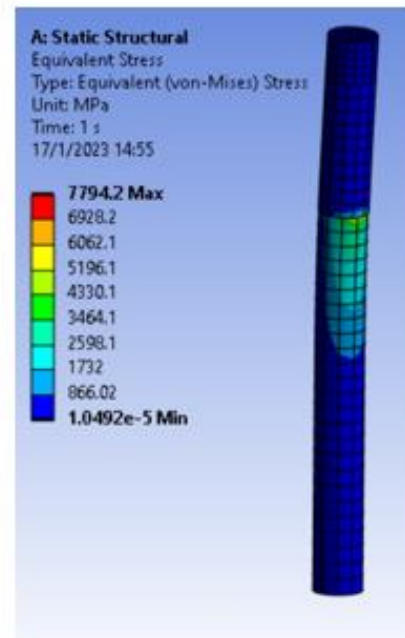
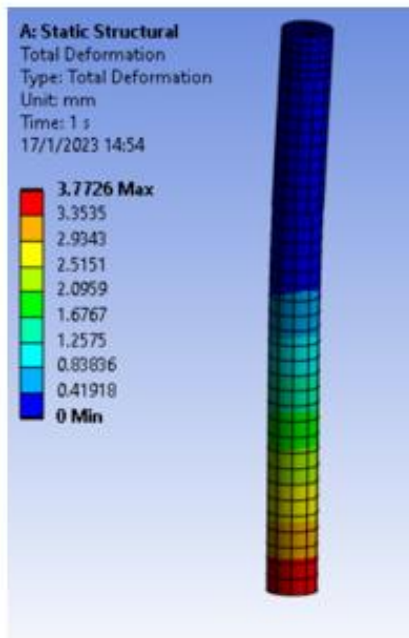
$$d = 39.57 \text{ mm}$$

$$d = 40 \text{ mm}$$

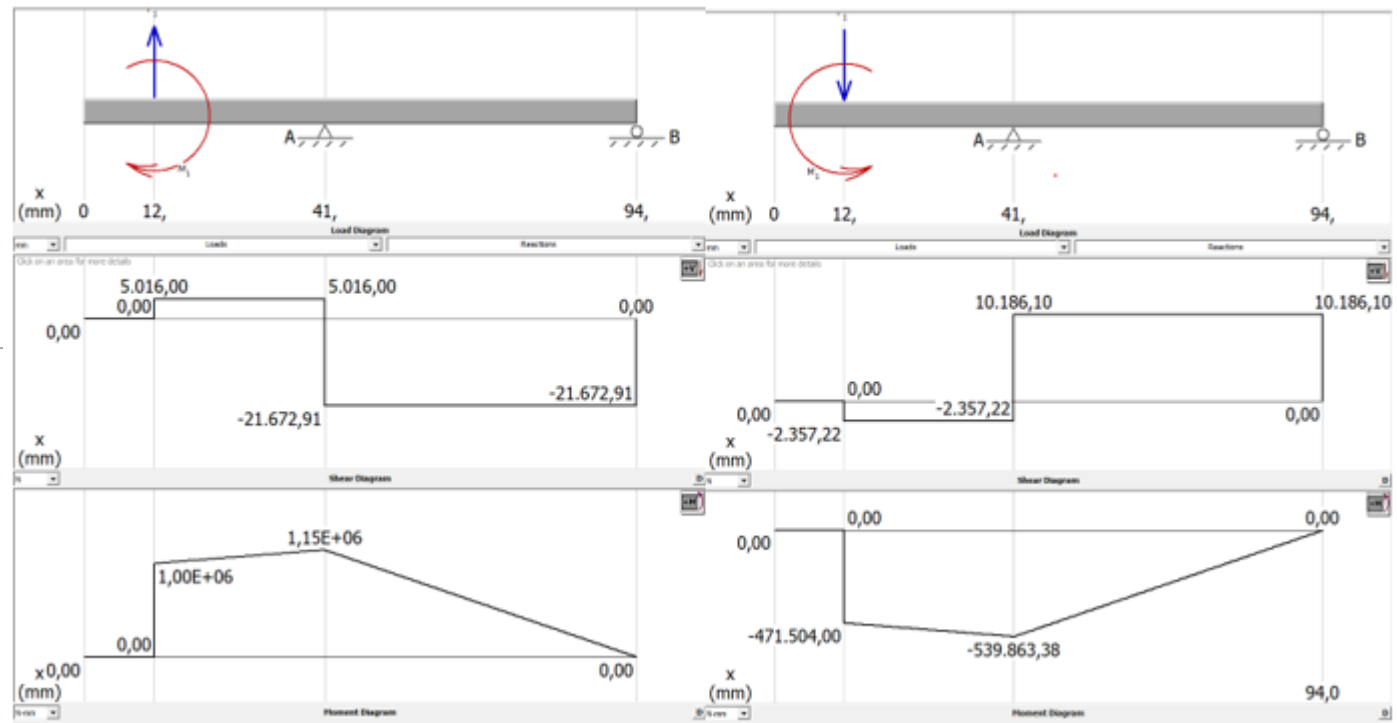
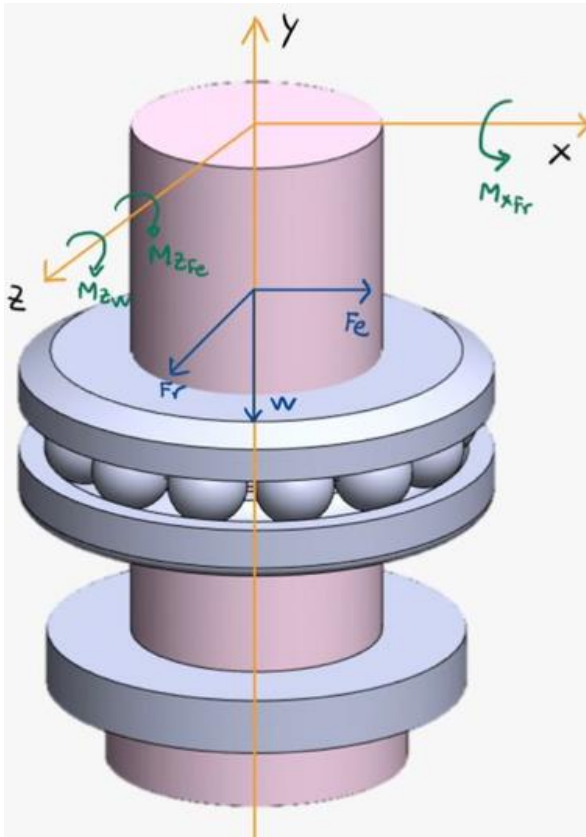
$$\frac{1}{nf} = \frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}}$$

$$\frac{1}{nf} = \frac{27.34 \text{ MPa}}{153.322 \text{ MPa}} + \frac{8.123 \text{ MPa}}{655 \text{ MPa}}$$

$$nf = 5.24$$



Pasador 2

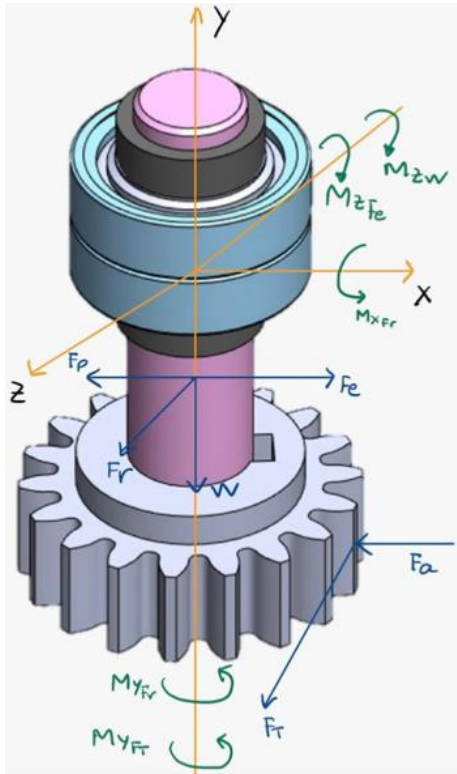


Dato	Valor
F_e	5016 N
F_r	2357,52 N
W	735,75 N
M_{zFe}	1003200 Nmm
M_{zW}	206010 Nmm
M_{xFr}	471504 Nmm

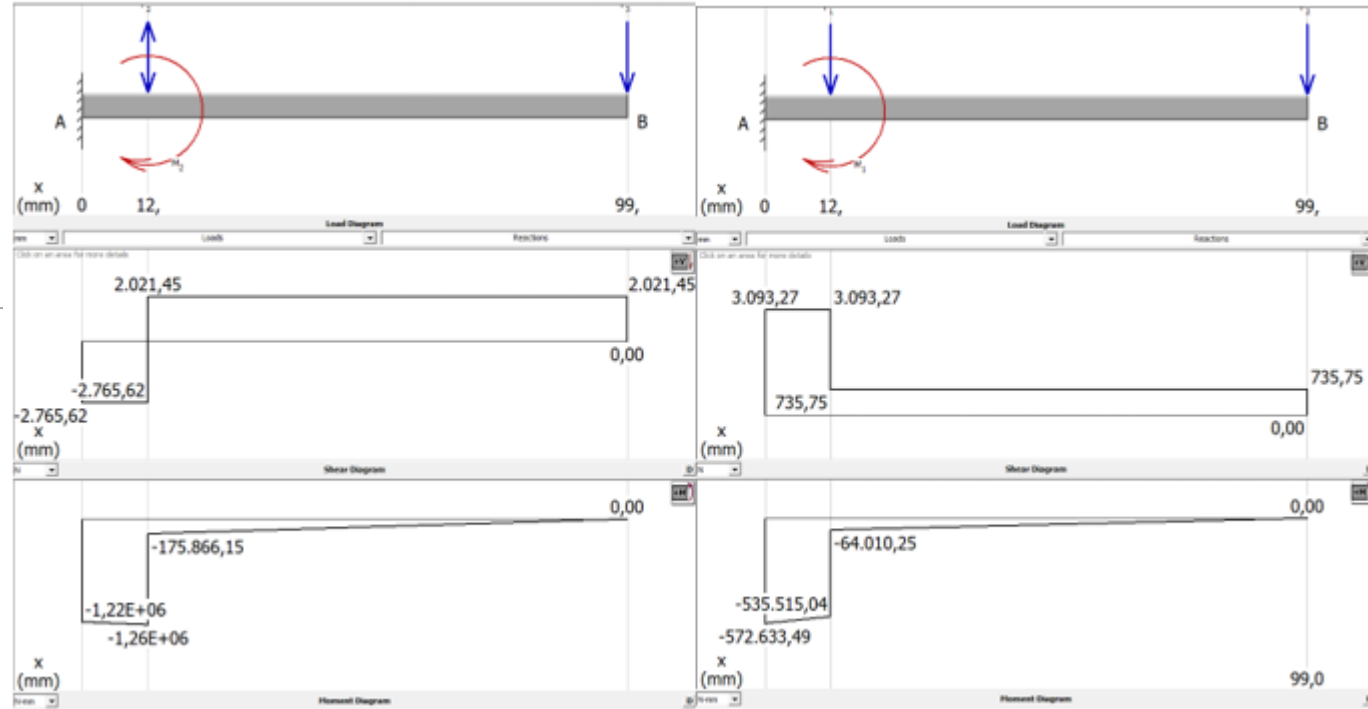
Dato	Valor
S_e	155.96 MPa
d	38.47 mm

Dato	Valor
k_D	0.78
S_e	122.74 MPa
nf	7.91

Pasador 3



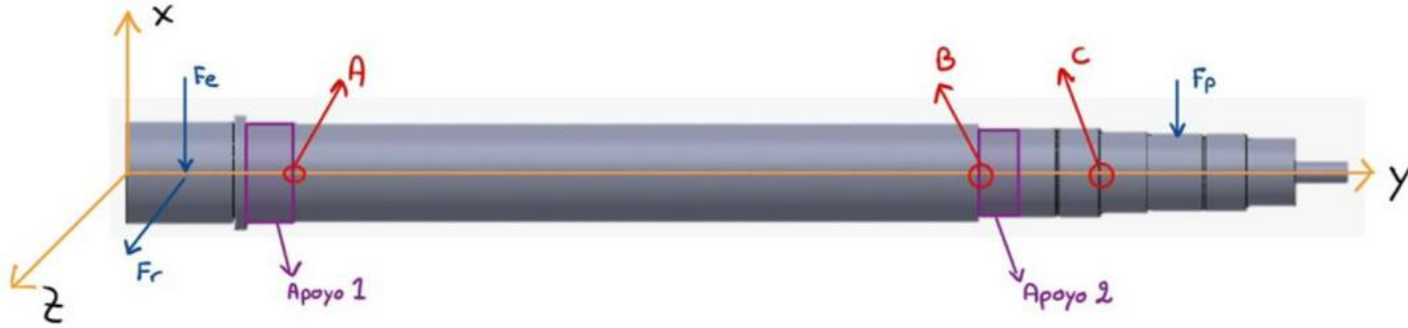
Dato	Valor
F_e	5016 N
F_r	2357,52 N
W	735,75 N
F_p	228,93 N
F_T	735,75 N
F_a	2021,45 N
M_{zFe}	1003200 Nmm
M_{zW}	77253,75 Nmm
M_{xFr}	471504 Nmm
M_{yFr}	22072,5 Nmm
M_{yFr}	417281,04 Nmm



Dato	Valor
S_e	155.96 MPa
d	20.56 mm

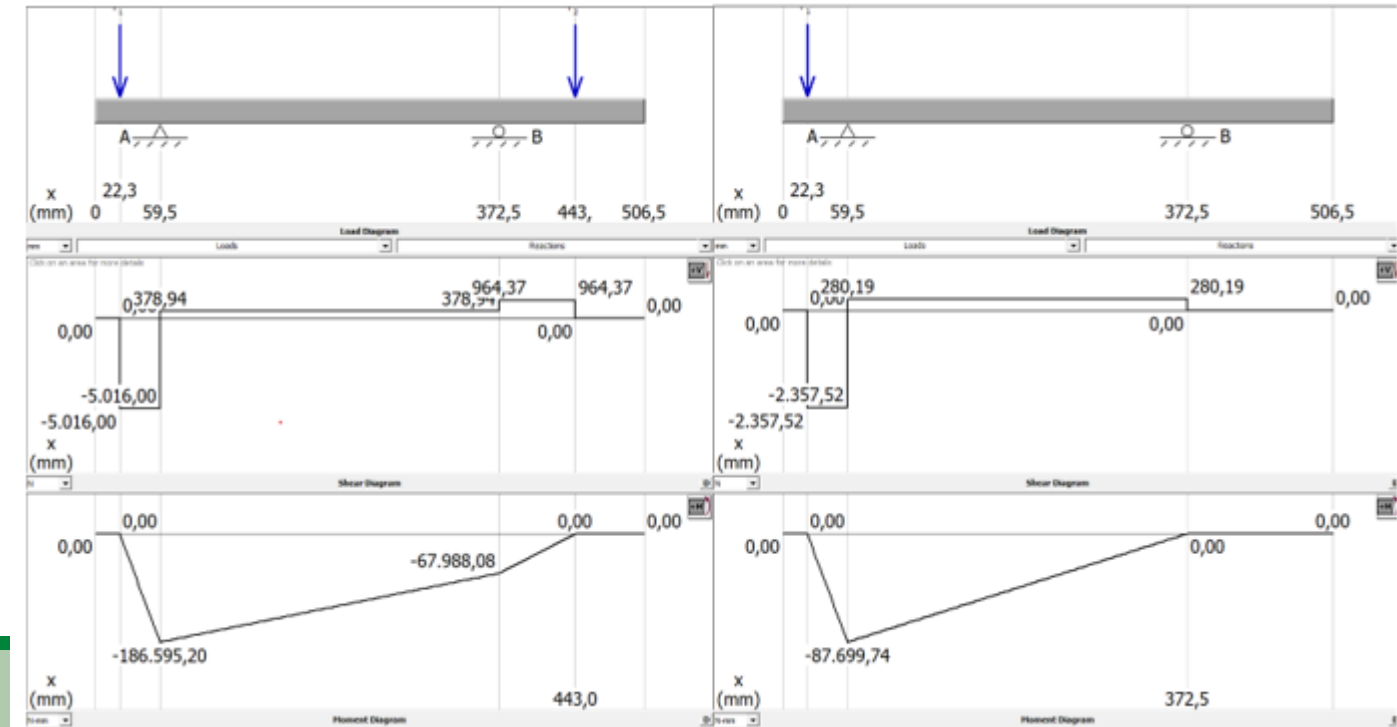
Dato	Valor
k_b	0.78
S_e	122.74 MPa
n_f	5.15

Eje de giro de la bandeja



Dato	Valor
S_y	485 MPa
S_{ut}	655 Mpa
M_a	206177.14 Nmm
T_m	971.3 Nmm
N	3

Dato	Valor
F_e	5016 N
F_r	2357,52 N
F_p	964,37 N



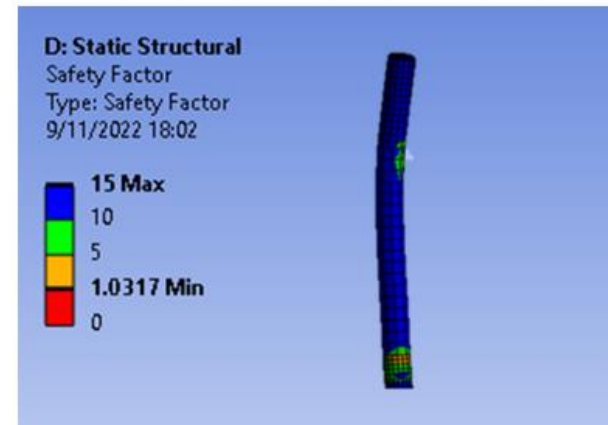
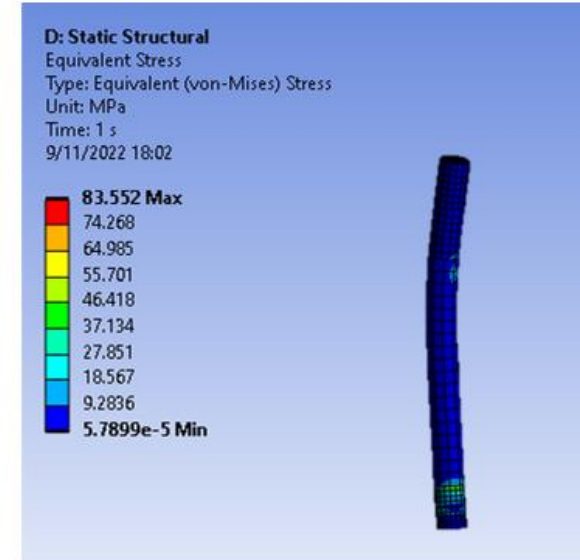
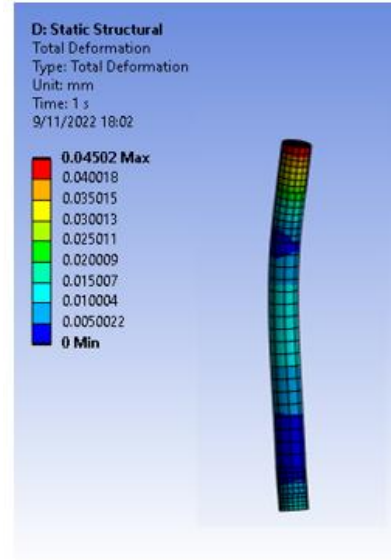
Eje de giro de la bandeja

En el punto A

Dato	Valor
S_e	110.09 MPa
D	43.66 mm

Dato	Valor
σ'_a	88.59 MPa
σ'_m	0.25 MPa
S_e	110.09 MPa
S_{ut}	655 MPa
nf	2.24

Dato	Valor
S_e	92.11 MPa
nf	2.02



Selección de motores



Torque requerido

$$T_{req} = (W + F_r) * d$$

$$T_{req} = (735.75 N + 752.40 N) * 41 mm$$

$$T_{req} = 61014.15 Nmm$$

$$T_{req} = 61.01 Nm$$

Potencia

$$P = T * \omega$$

$$P = 61.01 Nm * 17.45 rad/s$$

$$P = 1064.82 W$$

$$P = 1.43 HP$$

$$P_n = 1.30 * P$$

$$P_n = 1.30 * 1.43 HP$$

$$P_n = 1.86 HP$$

Características	Valor
Potencia	1,5 kW
Torque	7,16 Nm
Corriente que consume	8 A
Velocidad nominal	2000 rpm
Velocidad máxima	3000 rpm
Frecuencia	166,7 Hz
Peso	9 kg
Nivel de protección IP	65
Conexión eléctrica	3Φ AC86V
Factor de potencia	0,86

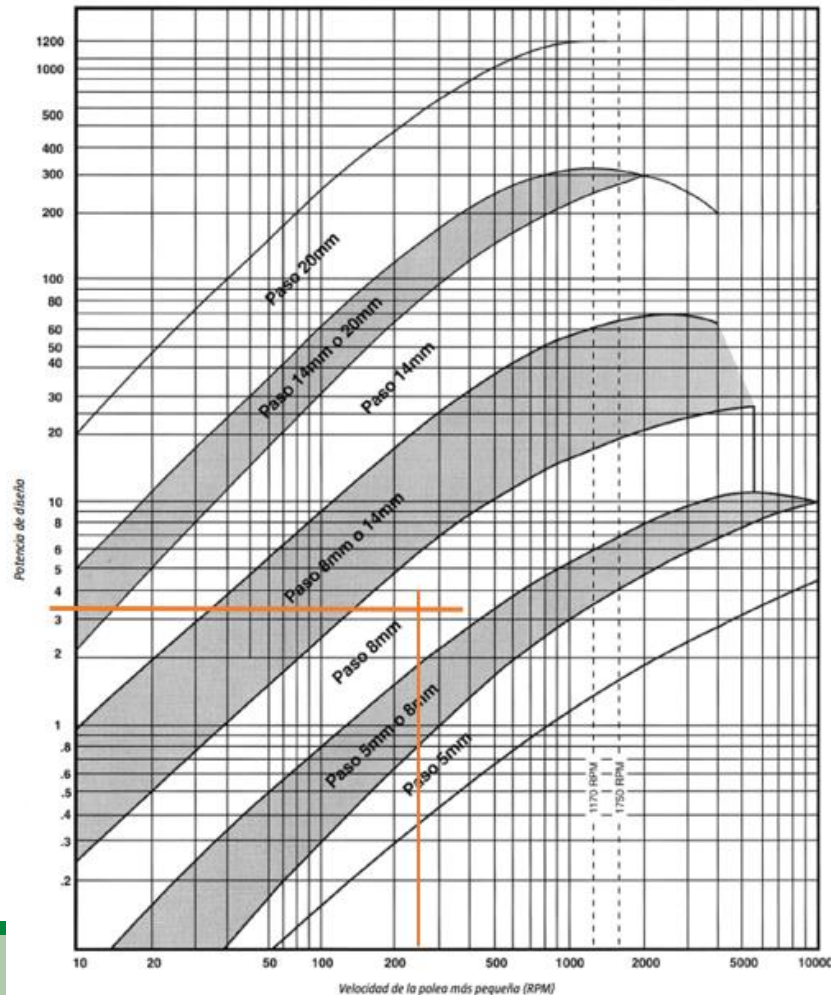
Selección de servodriververs



Los servodriververs seleccionados según (Xinje, 2021) cuentan con las siguientes características:

- Alta precisión de posicionamiento
- Funciona con corriente altera a 220V
- Potencia de salida de 1.5 kW
- Cuenta con comunicación con encoder
- Envía pulsos a 24V
- Comunicación por estándar modbus RS232 y RS485

Selección de bandas



Se tienen dos poleas de 30 dientes y una banda 1280-8M-20 donde:

- 1280 es la longitud de la correa en milímetros
- 8M es el código del paso
- 20 es el ancho de la correa en milímetros.

Selección de tornillo de bolas

Característica	Valor
Diámetro interno	25 mm
Paso	5 mm
Soporte para carga estática	16906,66 N
Soporte para carga dinámica	48091,81 N



Diseño de los engranes

Característica	Engrana interno	Engrane externo
Número de dientes	18	126
Diámetro de paso	54 mm	378 mm
Diámetro mayor	60 mm	385,5 mm
Diámetro menor	46,5 mm	372 mm
Diámetro de base	50,743	355,204
<u>Addendum</u>	3 mm	3 mm
<u>Dedendum</u>	3,75 mm	3,75 mm
Radio de filete	0,9 mm	0,9 mm
Ancho del diente	4,712 mm	4,712 mm
Ancho de la cara	18 mm	18 mm



$$\sigma = 85,94 \text{ MPa}$$

$$\sigma_d = 138,33 \text{ MPa}$$

Implementación del sistema

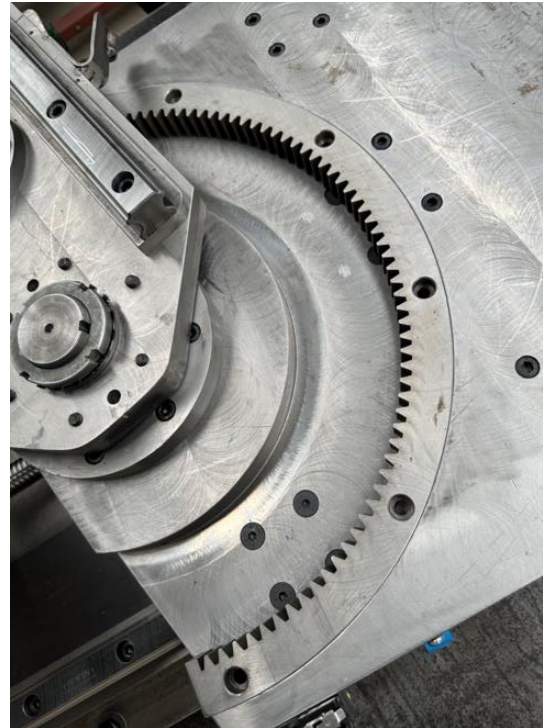
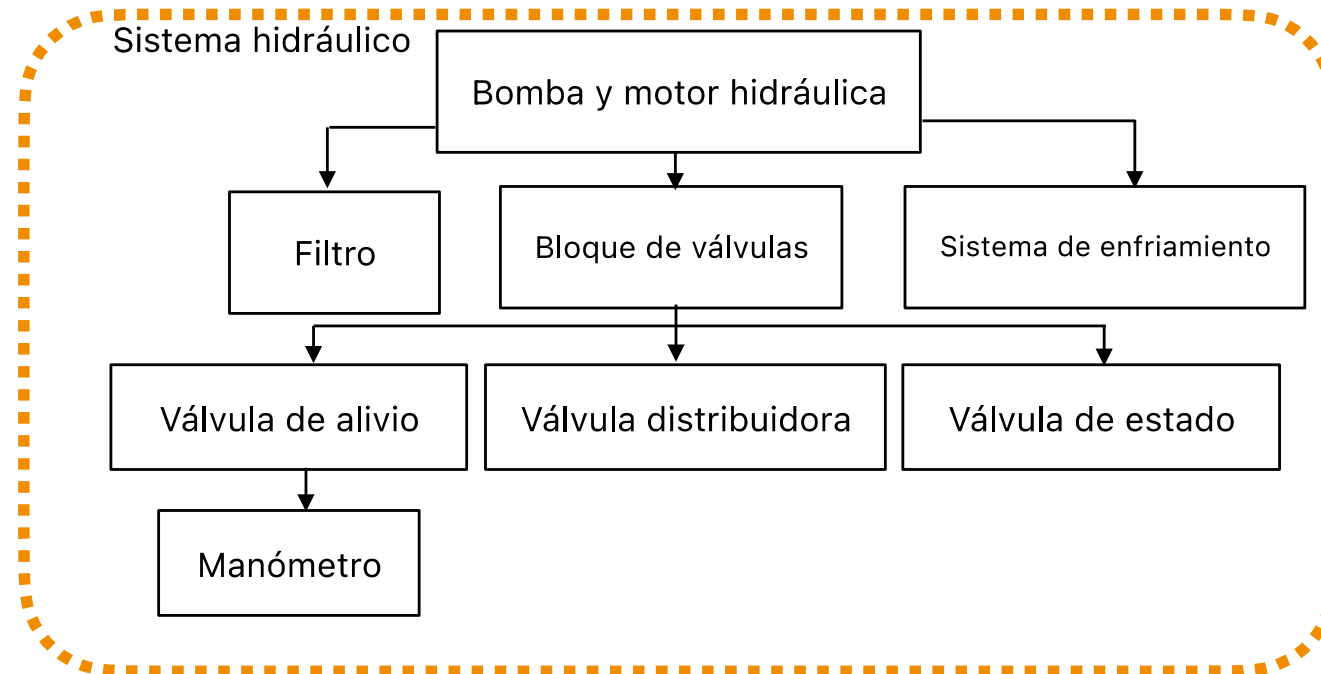
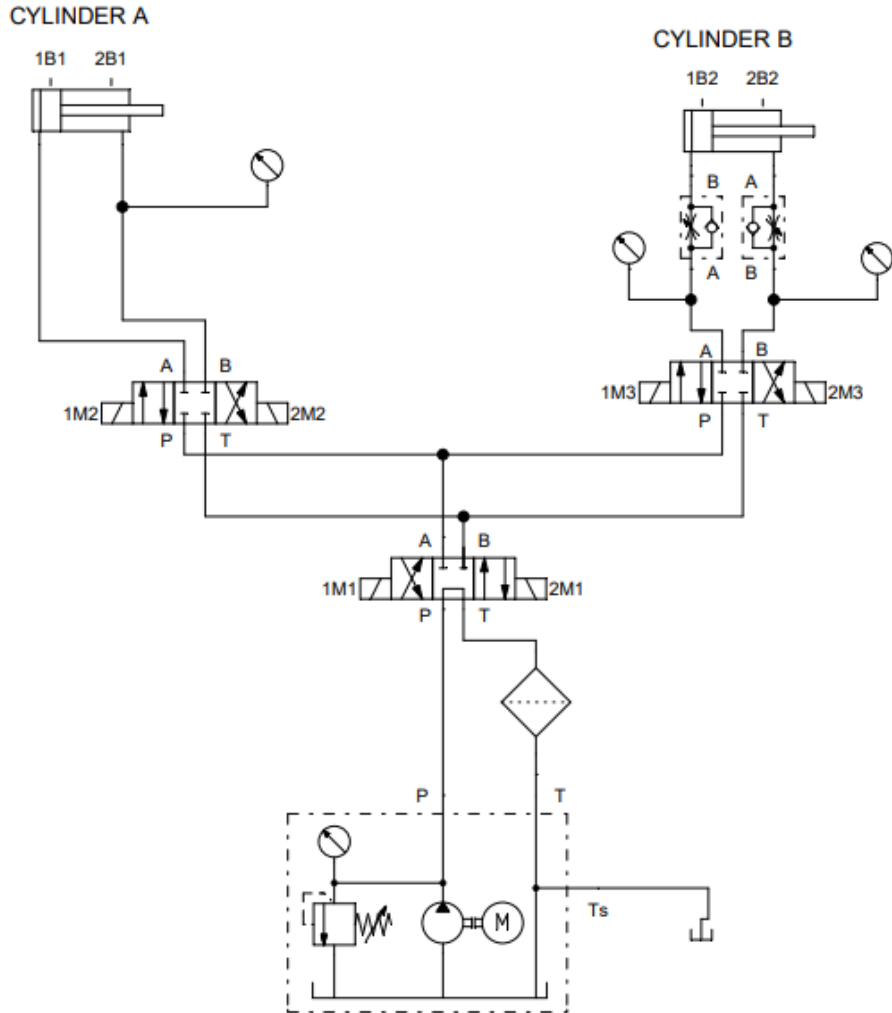


Diagrama de bloques del sistema hidráulico



Sistema hidráulico



Presión a aplicar por los cilindros

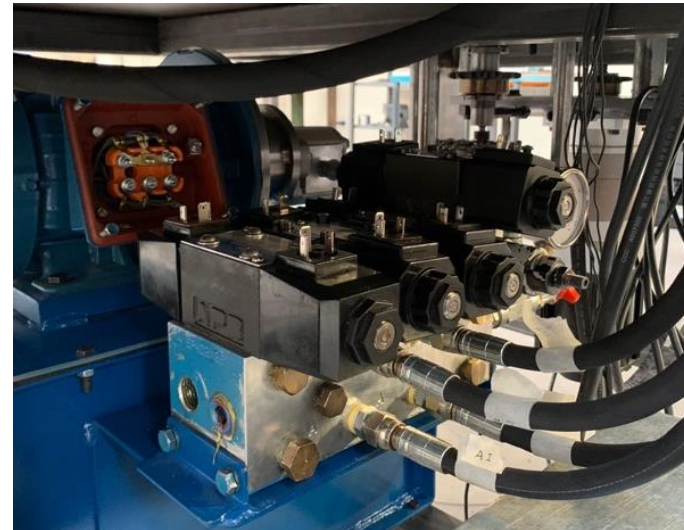
$$P = \frac{F}{0.9 \times A}$$

$$P = 706.33 \text{ psi}$$

Potencia de la unidad hidráulica

$$HP = \frac{P \times Q}{1714}$$

$$HP = 0.37 \text{ HP}$$

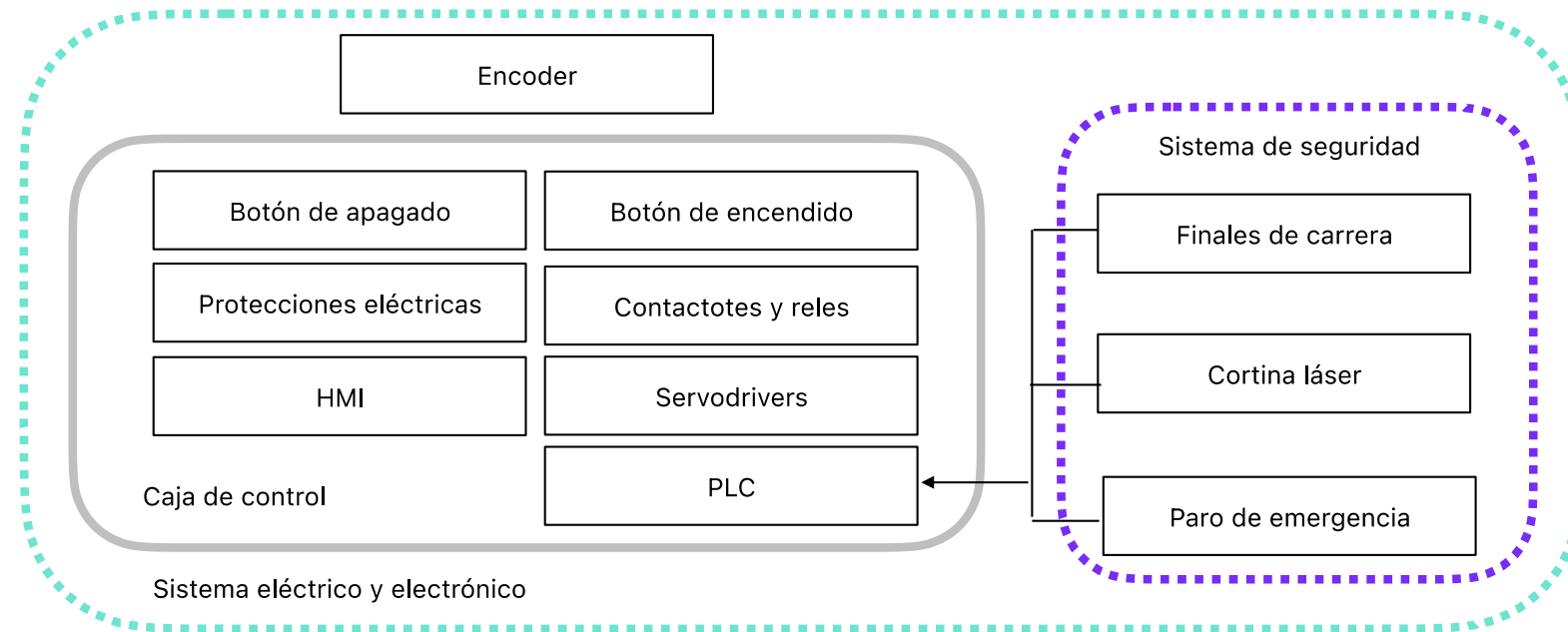


Unidad hidráulica

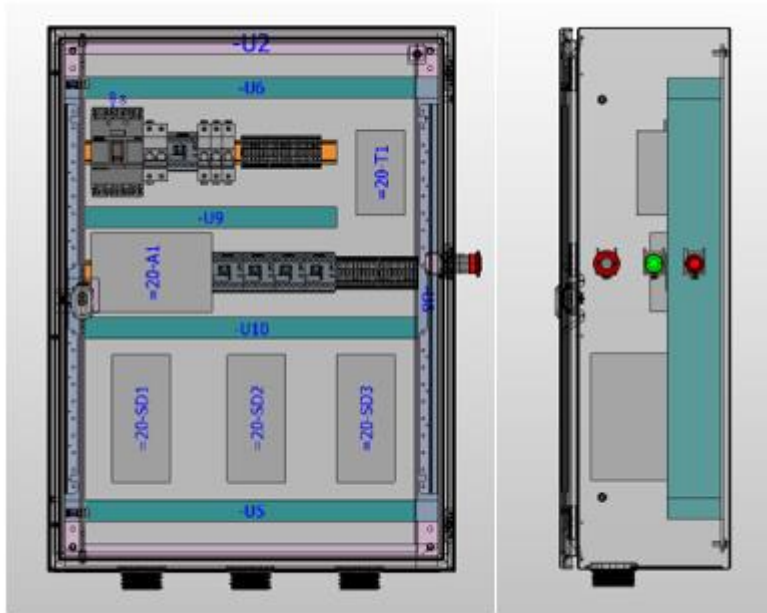
Característica	Valor
Potencia del motor	1.5kW
Conexión eléctrica	220V
Consumo	3 <u>cc/rev</u>
Válvula de alivio	Manual
Capacidad del tanque	20 L
Filtro de aceite	
Indicador de nivel	



Diagrama de bloques del sistema eléctrico

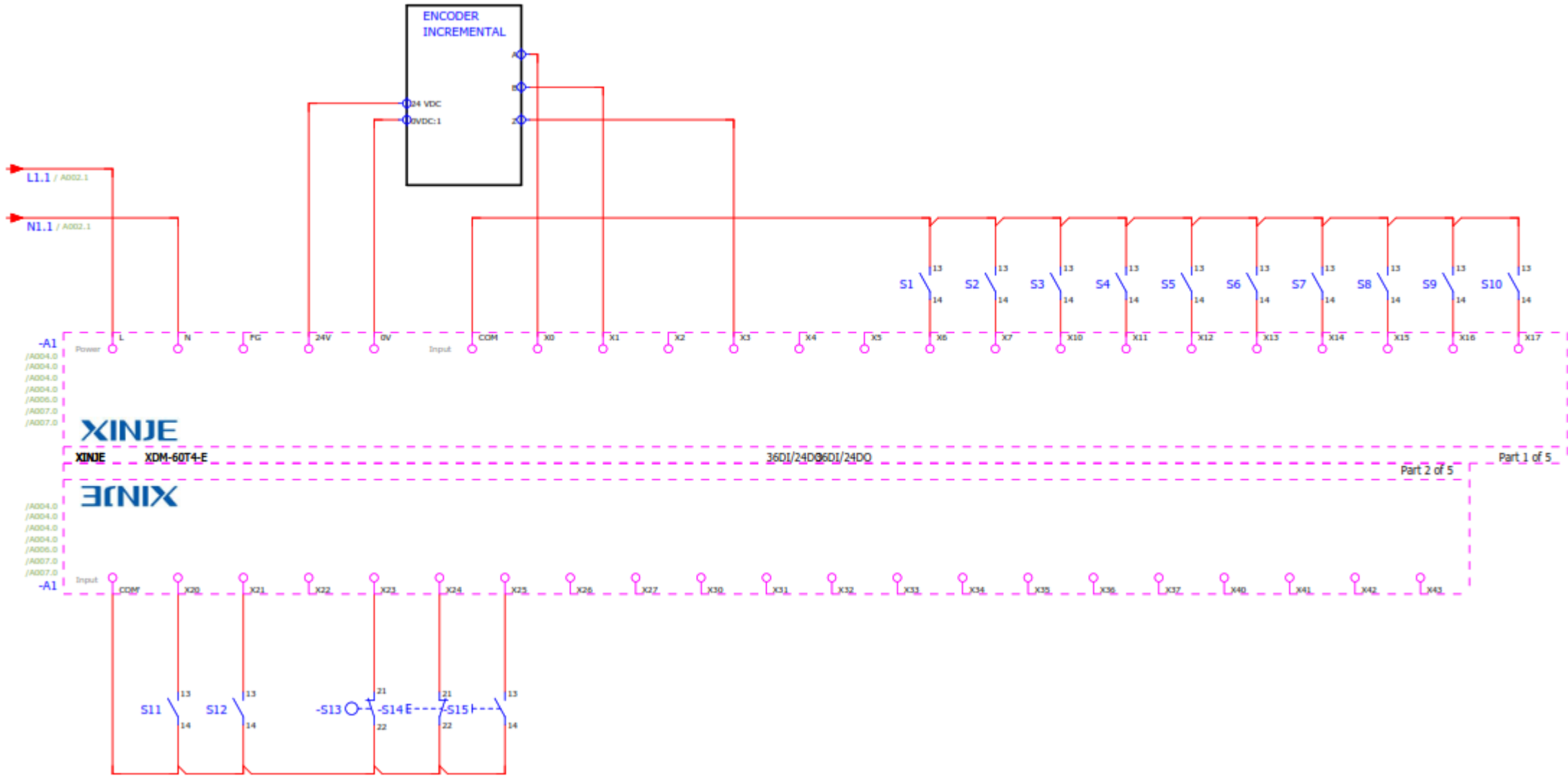


Tablero de control

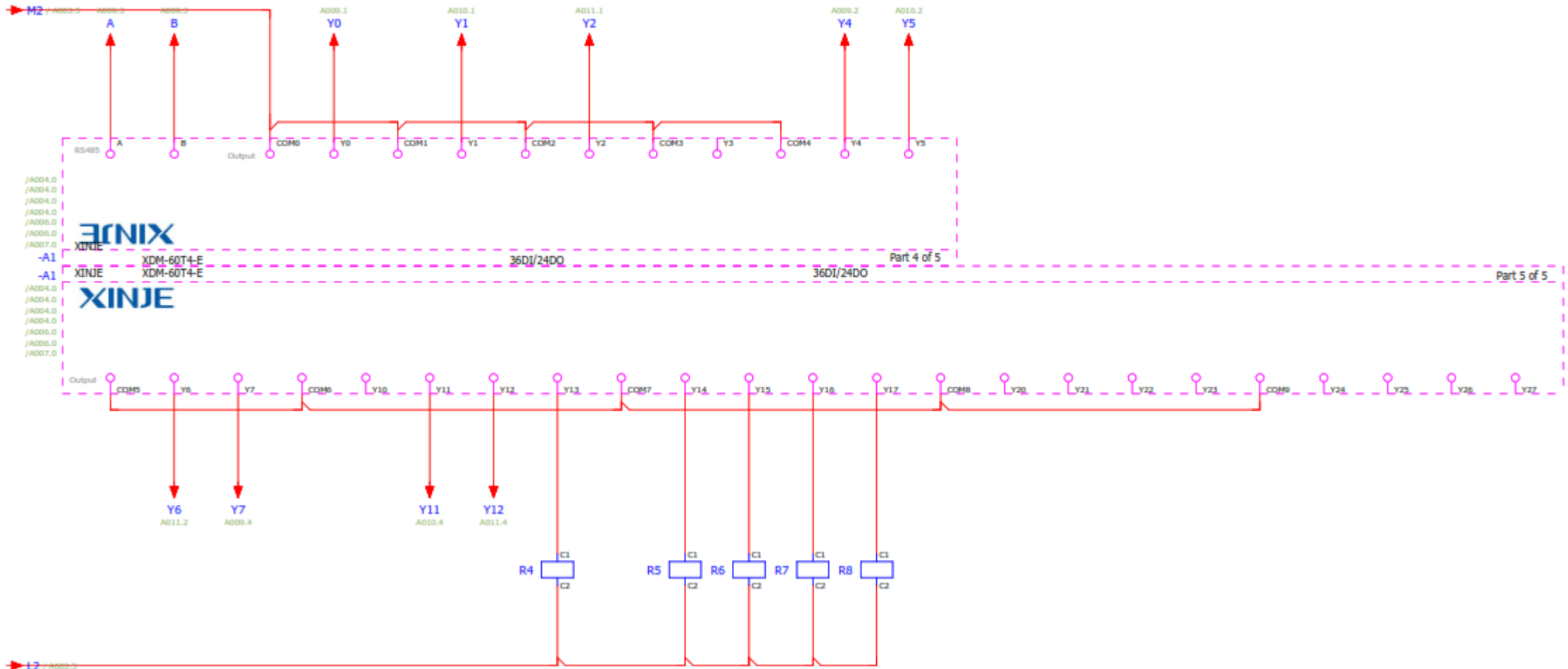




Entradas PLC



Salidas PLC



Conexión PLC y Driver

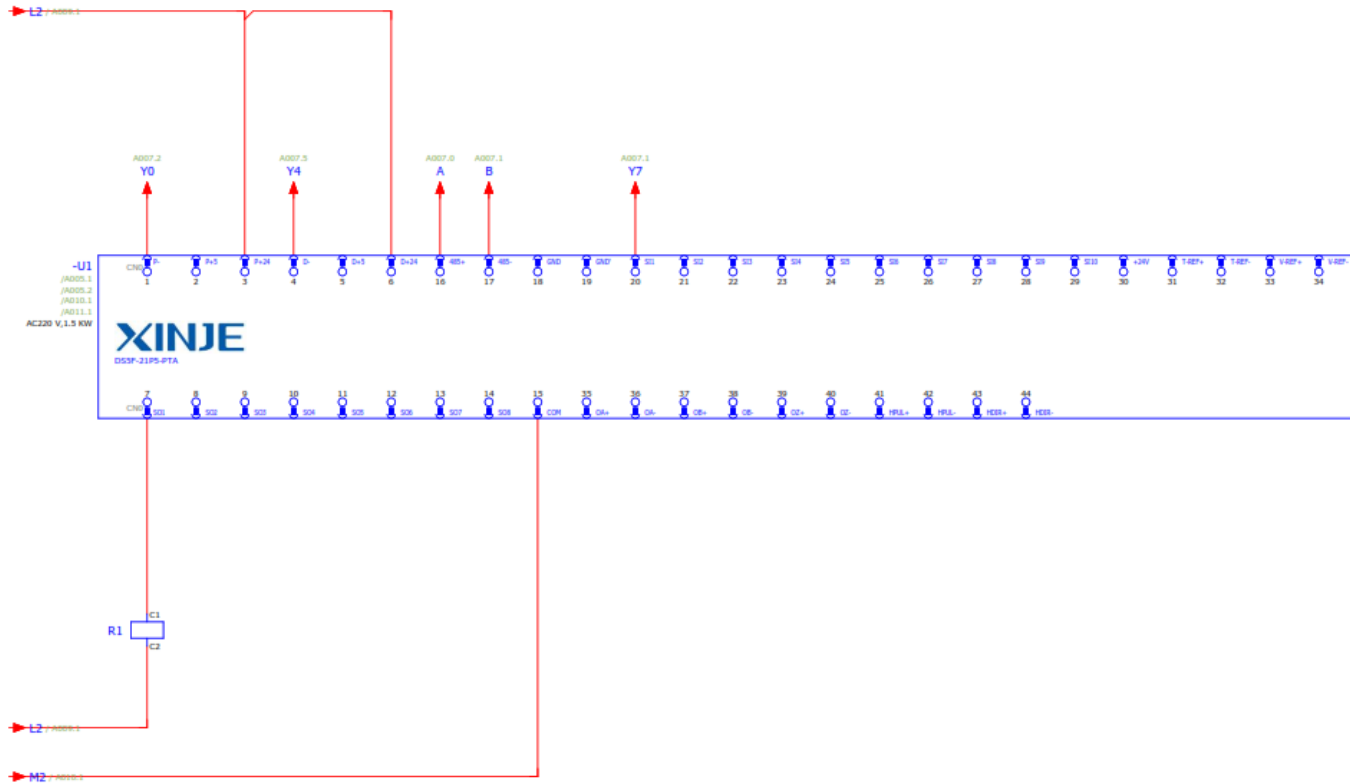
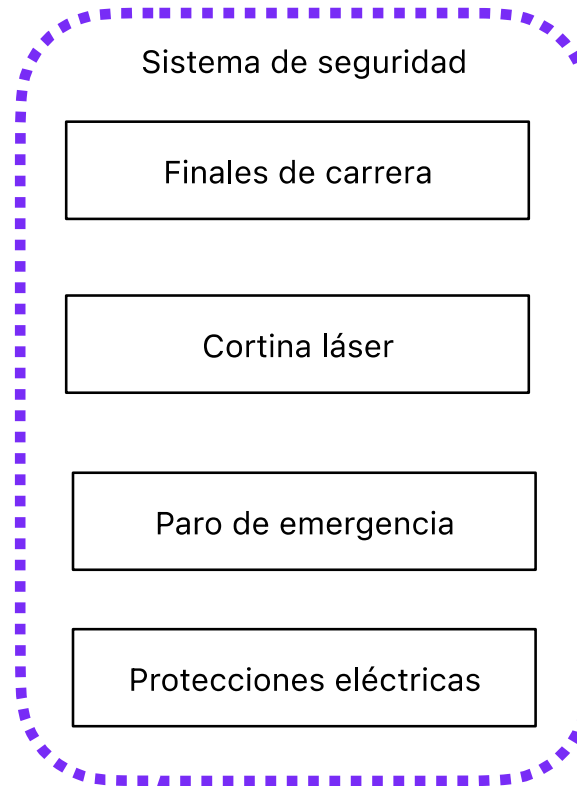
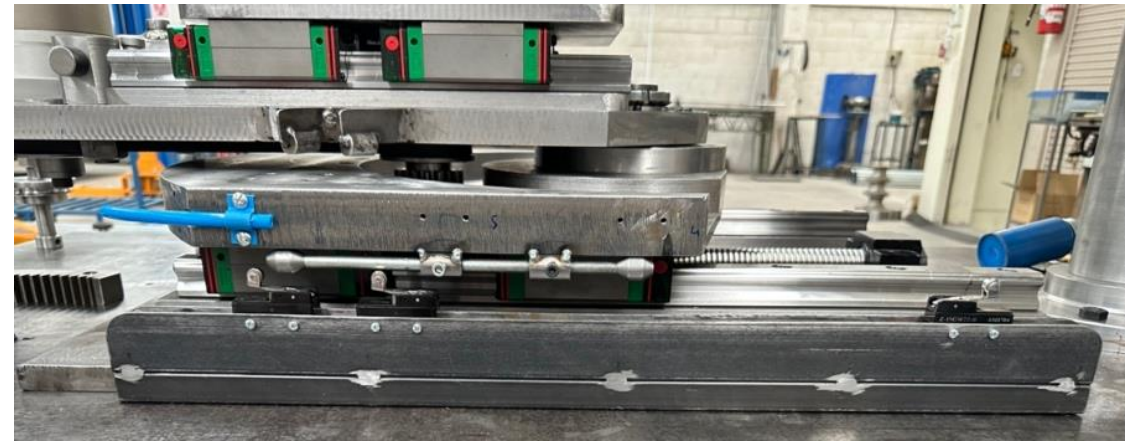
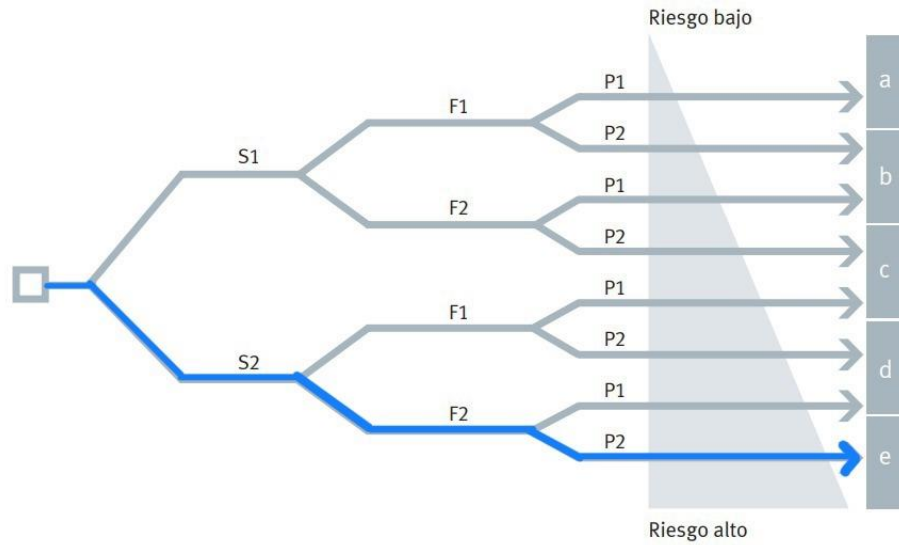


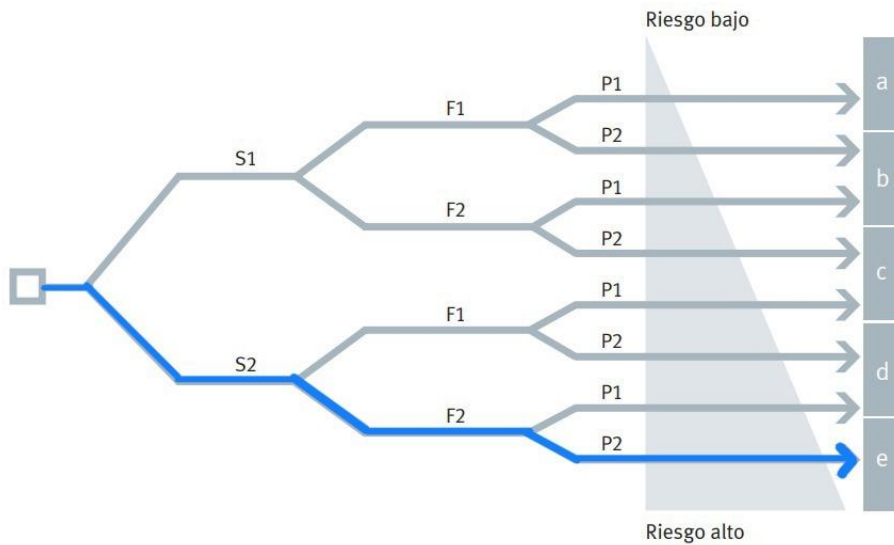
Diagrama de bloques sistema de seguridad



Niveles de prestación



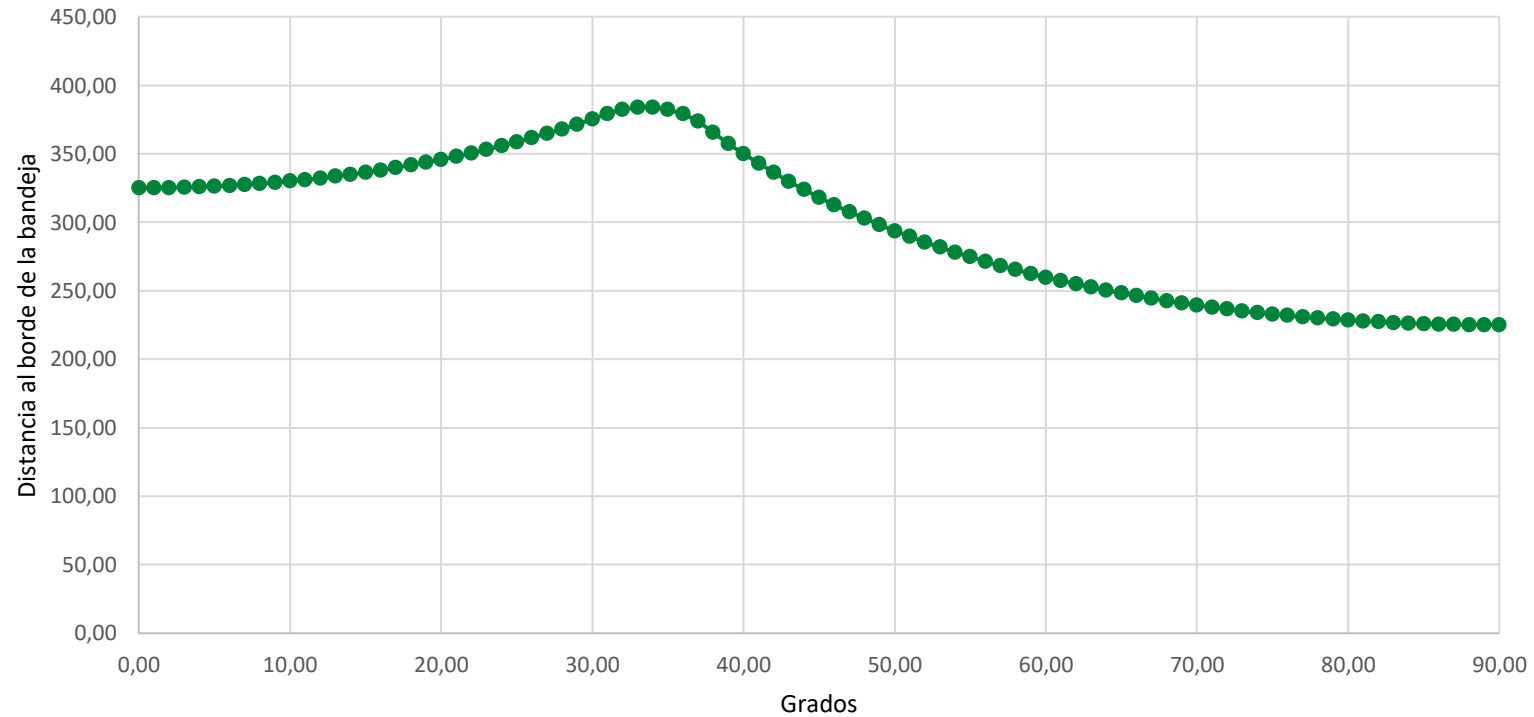
Niveles de prestación



	Entrada	Lógica	Salida	Nivel de prestación
	Interruptores	Relé	Contactores	
PL	e	e	d	d
	Botón paro de emergencia	PLC	Contactores	
PL	d	e	d	d
	Barrera láser de seguridad	PLC	Contactores	
PL	e	e	d	d
	Finales de carrera	PLC	Contactores	
PL	d	e	d	d

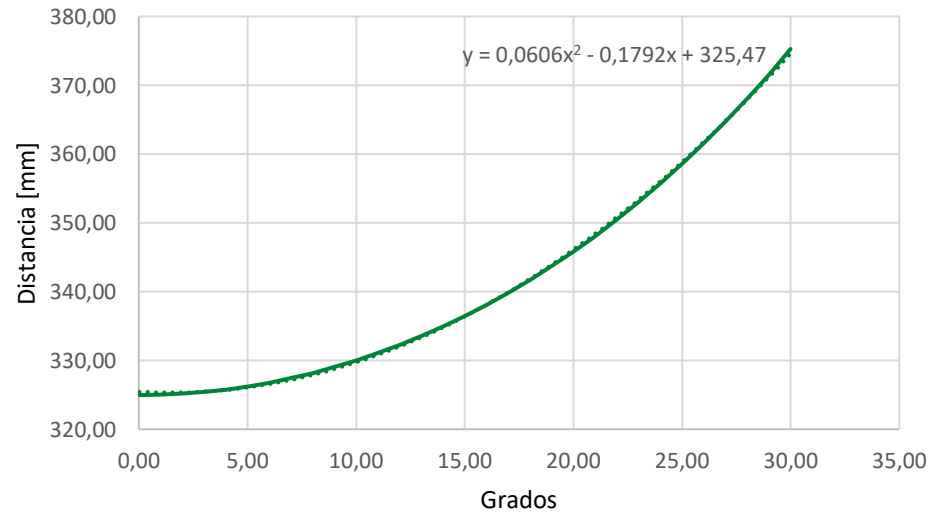
Sistema de control

Curva del borde de la bandeja (0-90 grados)

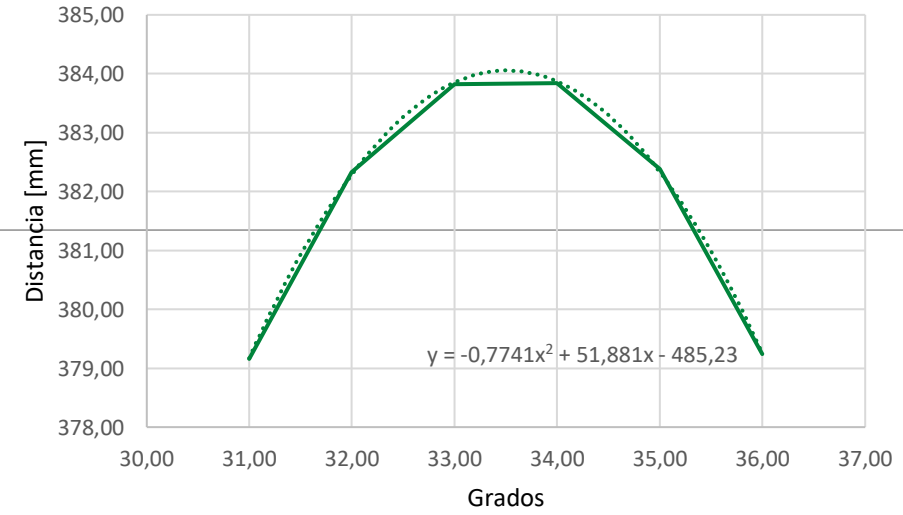


Sistema de control

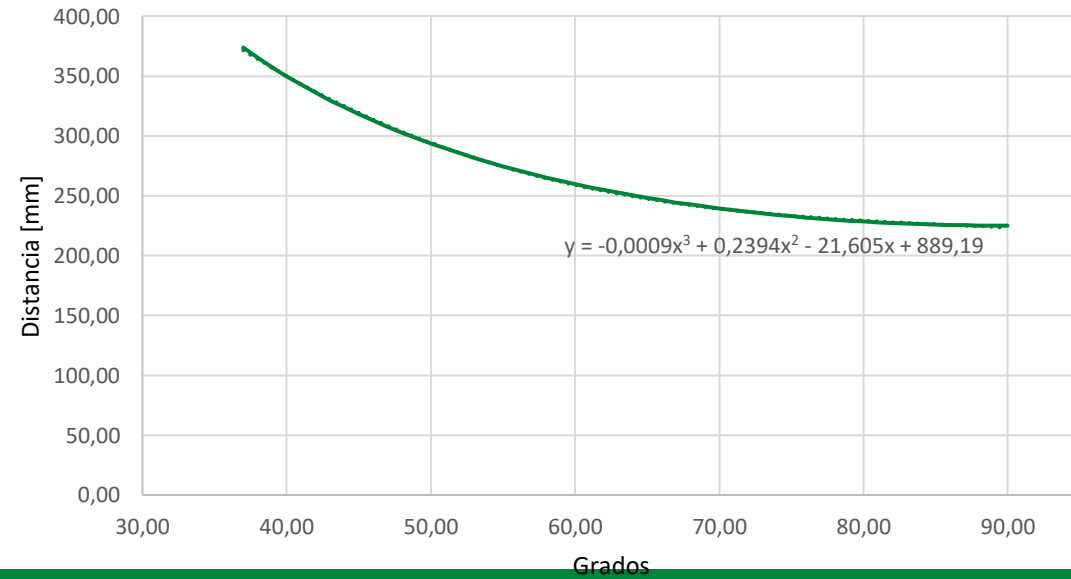
Segmento uno



Segmento dos



Segmento tres



Configuración en los drivers

Cálculo del número de pulsos por rotación y Ratio Electrónico Motor 1

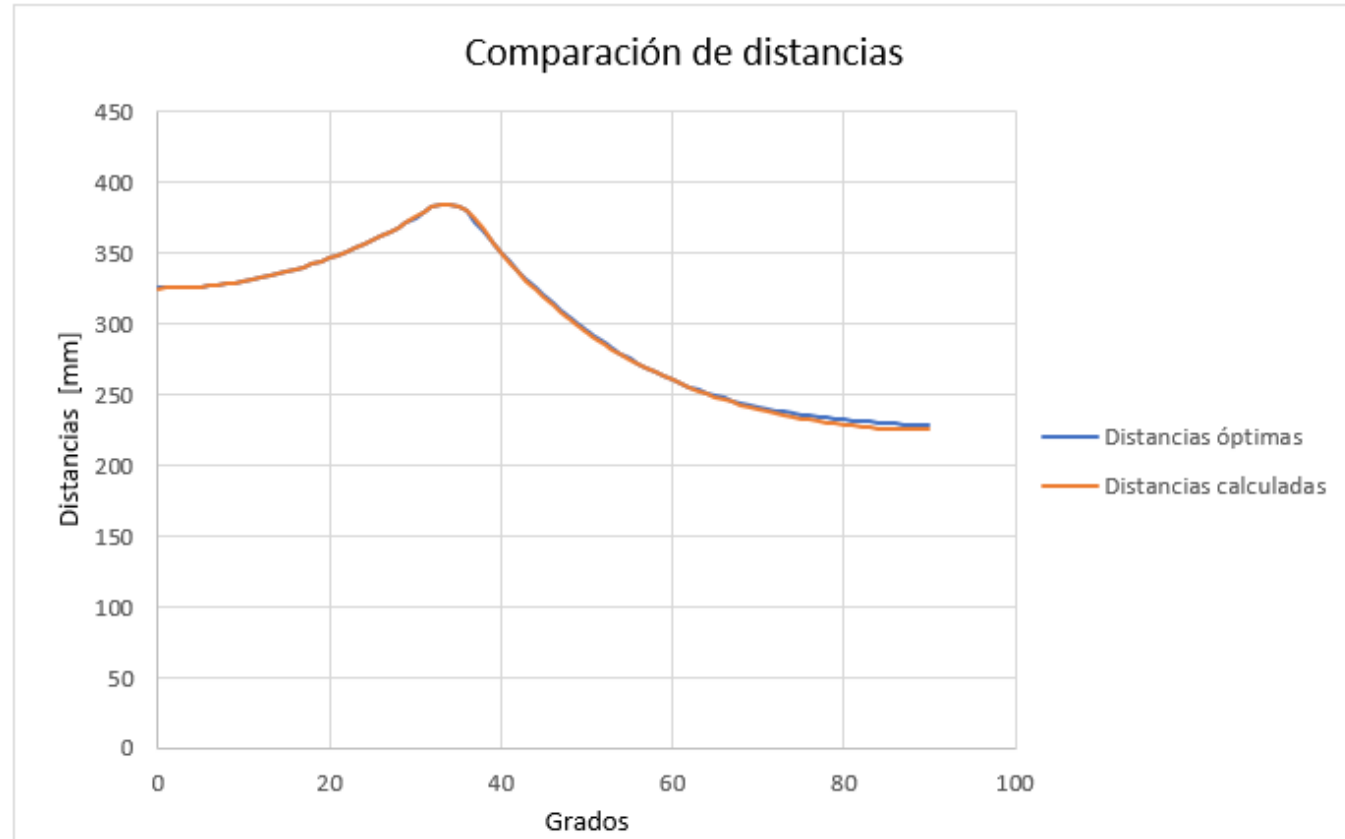
vueltas del servo motor	100	
vueltas de la carga	1	
Resolución del Servo encoder	131072	bits
recorrido por un pulso	0,1	grados
Cantidad de pulsos requeridos por una revolución para la carga	3600	pulsos
Cantidad de pulsos requeridos por una revolución para el motor	360000	pulsos

Mechanical returning zero

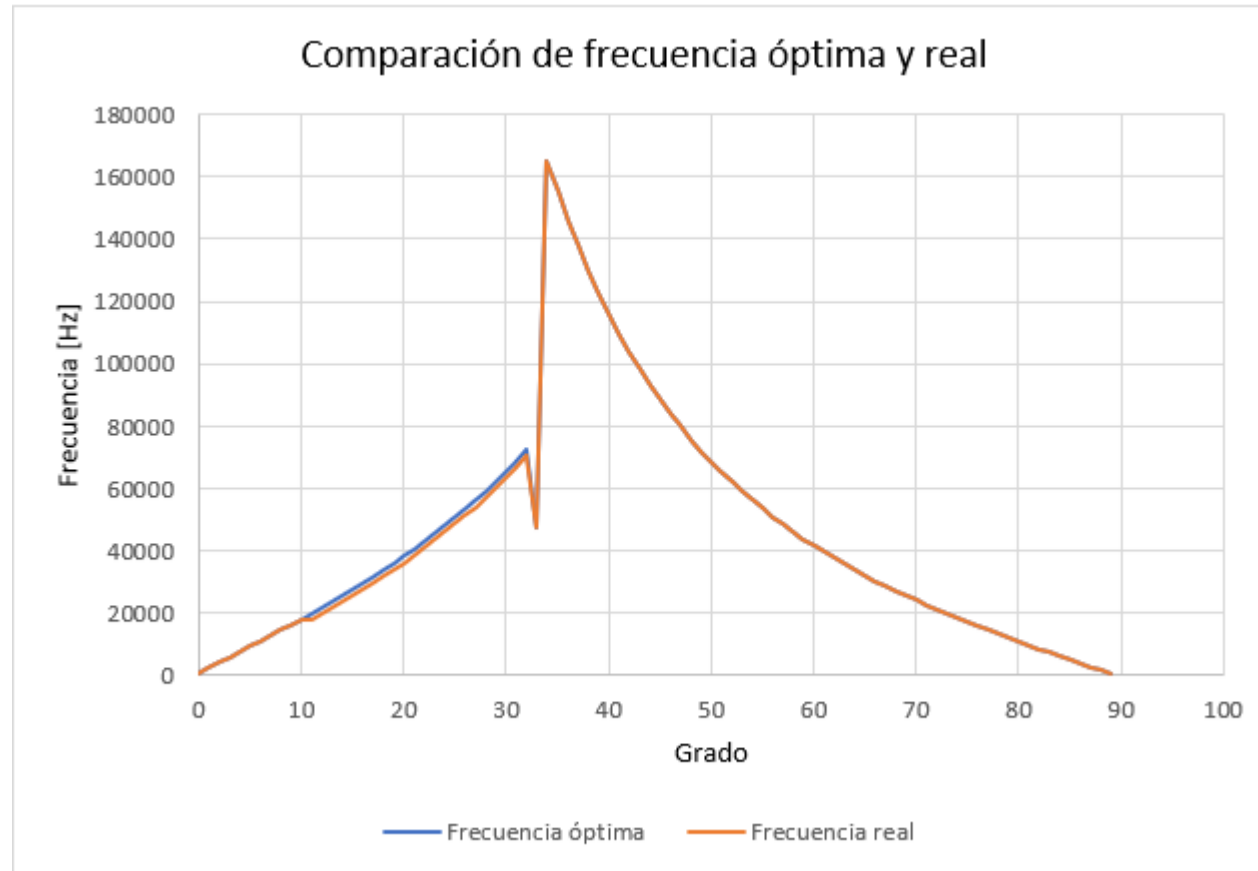
- 1.1. Mechanical returning zero default direction
2. Origin switch state
3. origin signal terminal
4. Returning speed VH
5. crawling speed VC
6. Mechanical origin position
7. Z phase switch state
8. Z phase signal terminal
9. Z phase pulse numbers
10. CLR signal delay time
11. CLR signal terminal

Note: this parameter will change as the pulse unit.

Pruebas



Pruebas



Pruebas

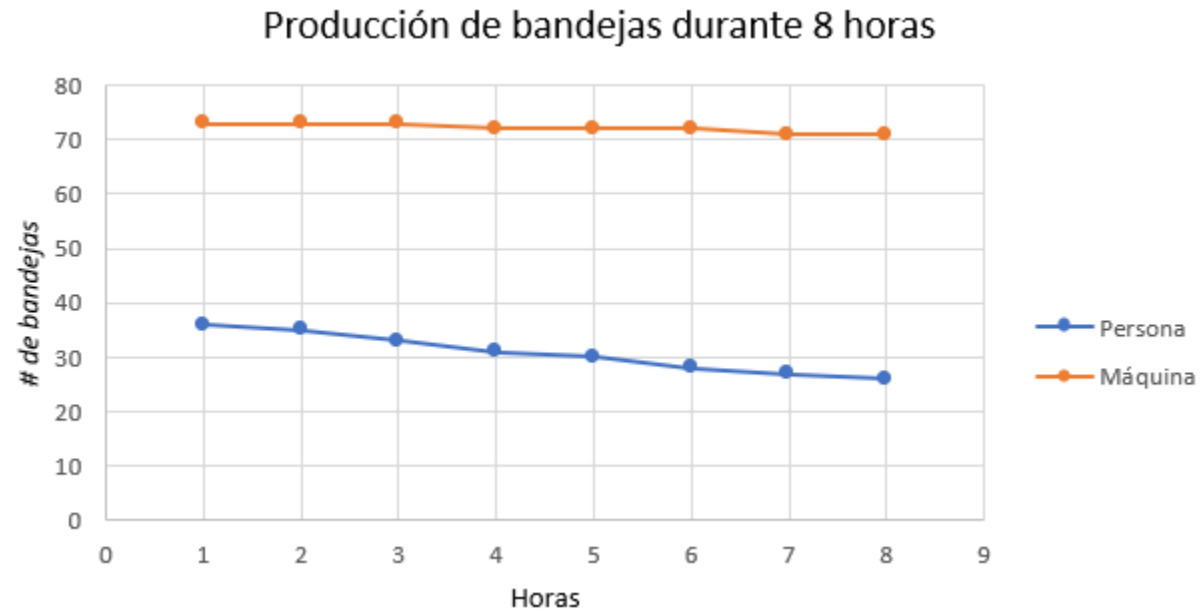
Parámetros para determinar si la prueba fue exitosa o no.

1. Activación del sistema mediante botón
2. Desplazamiento del cilindro vertical para sostener la bandeja en su lugar
3. Acercamiento del sistema de empuje hacia la bandeja
4. Rotación controlada de la bandeja
5. Perpendicularidad de la herramienta con la bandeja
6. Seguimiento de la esquina de la bandeja
7. Acabado del doblado en las esquinas contado en número de pliegues del material
8. Alejamiento del sistema de empuje al terminar
9. Vuelta completa del eje de giro de la bandeja

Pruebas

Parámetro	Porcentaje de éxito
1	100
2	100
3	100
4	100
5	80
6	90
7	2,15
8	100
9	90

Pruebas



Validación de Hipótesis

Esta validación debe realizarse con el 99% de confiabilidad y se plantean la siguiente hipótesis:

H₀: la eficiencia en el tiempo de producción de una bandeja de aluminio con la máquina rebordeadora con niveles de prestación (PL) es igual o mayor a la eficiencia en el tiempo de producción de una bandeja de aluminio hecha manualmente.

H₁: la eficiencia en el tiempo de producción de una bandeja de aluminio con la máquina rebordeadora con niveles de prestación (PL) es inferior a la eficiencia en el tiempo de producción de una bandeja de aluminio hecha manualmente.

Validación de Hipótesis

Se utiliza el método de T-Student, que cumple con la siguiente ecuación

$$t = \frac{\widehat{X}_D}{\frac{s_D}{\sqrt{n}}}$$

Donde:

- \widehat{X}_D es la media de las diferencias
- s_D es la desviación estándar de las diferencias
- n el número de pruebas.

Validación de Hipótesis

No. prueba	Tiempo máquina	Tiempo Persona	Diferencia
1	43	98	55
2	45	103	58
3	53	102	49
4	57	95	38
5	50	107	57
6	45	103	58
7	48	95	47
8	47	102	55
9	53	106	53
10	51	109	58
11	60	94	34
12	48	92	44

$$t = \frac{50.9}{\frac{26.0278}{\sqrt{20}}}$$
$$t = 8.74$$

Entonces para el 0.01 de error y 19 grados de libertad, el valor obtenido por tabla es de 2.539, con lo que se tiene que:

$$8.74 > 2.539$$

Por tanto, la eficiencia en el tiempo de producción de una sola bandeja es menor con el uso de la máquina rebordeadora con niveles de prestación (PL) comparado con el proceso manual, con lo cual la hipótesis planteada en el presente trabajo se verifica. Aumentando la eficiencia en el tiempo de fabricación en un 102%.

Conclusiones

Se determinó la fuerza de doblado para el método utilizado en este trabajo, siendo de 5016N y que, por ende, deberá ser aplicada por la máquina al borde de la bandeja de aluminio.

Se seleccionó el material al ASTM A36 para la elaboración de los elementos mecánicos logrando un factor de seguridad de 5.24 en el pasador uno, 7.91 para el pasador dos y 5.15 para el tercer pasador. Además, en el eje de giro de la bandeja se logra un factor de seguridad de 2.24, siendo todos aceptables para un buen diseño.

Para lograr ejercer una fuerza de 5016N con un diámetro interno en la camisa del cilindro de empuje 38 mm se necesita un sistema hidráulico que produzca 706.33psi de presión el mismo que deberá entregar un caudal de 3cc/rev para generar la fuerza de doblado necesaria.

La implementación de una cortina laser como sistema de seguridad en el punto crítico de operación de la máquina alcanzo una efectividad 100% durante las pruebas, dando la seguridad al operario de que la máquina se detendrá ante una intervención en el área de seguridad, evitando posibles accidentes.

Durante las pruebas del resto de los sistemas de seguridad como el botón de paro de emergencia y final de carrera también alcanzaron una efectividad del 100%.

El sistema de control implementado se basa en encontrar el desplazamiento de los ejes motrices según la variación de la distancia del centro de la bandeja al borde denominado radio con una variación de un grado, siguiendo las esquinas de manera eficiente en un 90% de las veces, el 10% faltante se retira unos milímetros de la trayectoria ideal, en lo referente al resto de la trayectoria no se presentó ningún problema y en el control de los demás sistemas que son secuenciales, se dieron de manera correcta el 100% de las pruebas.

En base a la norma EN ISO 13849-1 se determinó que el nivel de prestación ideal para esta máquina en el nivel e (Ple) debido a la alta probabilidad de accidente entre el operario y la máquina por su constante interacción, sin embargo, se alcanzó un nivel de prestación d (PLd), que es uno inferior al deseado pero que funciona de excelente manera dados los resultados durante las pruebas.

El aumento de producción de las bandejas incremento en un 102% diario, ya que el tiempo de producción de cada una de esta se redujo de casi dos minutos a un promedio de 49,5 segundo por bandeja, siendo un resultado ideal para la producción de cada lote por parte de la empresa Tel-Gar

Recomendaciones

Para alcanzar un mayor nivel de prestación es mejor seleccionar elementos mecánicos, hidráulicos, de control y de seguridad que ya cumplan con la norma EN ISO 13849-1 y que tengan un nivel de prestación determinado.

Si es necesario colocar una válvula de alivio en el sistema hidráulico verificar la conexión ideal para evitar caídas de presión en el sistema.

Realizar los mecanizados de piezas como los engranes y los ejes con equipo de alta precisión, ya que el juego mecánico en estos elementos puede generar un gran impacto en el posicionamiento del resto del sistema mecánico y afectará el correcto control del sistema.

Se debe tomar en cuenta que, al ser un único sistema hidráulico para ambos actuadores, la bomba debe ser capaz de brindar la presión necesaria para lograr la fuerza crítica del sistema, para el presente caso, el cilindro de empuje.

El punto de contacto entre la bandeja y la herramienta tiene que ser siempre el mismo, ya que de otra forma se debería tomar en cuenta la distancia entre el punto actual y el anterior de contacto entre la bandeja y la herramienta para el cálculo de su movimiento al siguiente grado.

El eje de giro del sistema de engranes debe ser concéntrico al centro del radio de la esquina de la bandeja para que la máquina logre realizar la curvatura sin problemas.

Para encerrar la máquina, las velocidades de búsqueda no tienen que ser exageradas para que la máquina pueda reaccionar ante la señal del final de carrera y la velocidad de retroceso tiene que ser incluso menor para tener mayor exactitud en la calibración.

El sistema de control basa su funcionamiento en el cálculo de la distancia entre el centro y el borde de la bandeja por lo que es recomendable utilizar los datos reales de las distancias, en especial en los últimos grados de la trayectoria calculada debido al error que presenta este cálculo, con el fin de obtener un seguimiento de la geometría de la bandeja y por ende un mejor resultado.

GRACIAS