

	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA FACULTAD DE INGENIERÍAS INGENIERÍA MECATRÓNICA AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL SEGUNDA ENTREGA PROYECTO INTEGRADOR
-----------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Título proyecto
IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE EMBOTELLADO Y SELLADO DE ENVASES PET DE AGUA EN PROTOTIPO DE BANDA TRANSPORTADORA

Integrantes	
Nombre	Código
NEIL SEBASTIAN CASTRO CAICEDO	U00131867
HUBERT ARMANDO DELGADO MAESTRE	U00091396

1. DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

En el laboratorio de automatización de la Universidad Autónoma de Bucaramanga (UNAB), se dispone de una banda transportadora conectada a un variador de frecuencia Siemens y a una caja reductora. Sin embargo, actualmente su funcionalidad se limita a encenderse y moverse en una dirección a una velocidad constante. En vista de esta situación, se considera la posibilidad de adaptar una zona de la banda transportadora para brindarle una aplicación específica en el ámbito de la industria alimentaria.

El proyecto integrador del séptimo semestre se concibe como la oportunidad ideal para, en primer lugar, otorgar un uso más específico a la banda transportadora del laboratorio de automatización. Por otro lado, también se plantea iniciar la investigación y desarrollo de prototipos primigenios, los cuales permitirán obtener la información y experiencia necesarias para la realización del proyecto de grado en semestres futuros.

2. OBJETIVO GENERAL

Automatizar un proceso de llenado y sellado de envases PET diseñado para ser acoplado en la banda transportadora del laboratorio.

3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Diseñar en la banda transportadora las estructuras de las estaciones del sistema: llenado, colocación de tapa y enroscado correspondiente.
2. Construir las estructuras de las estaciones del sistema asegurando que se ajusten a las dimensiones requeridas y se sincronicen con el funcionamiento de la banda transportadora.
3. Automatizar las estaciones del sistema, garantizando una operación fluida y eficaz en el contexto del sistema de la banda transportadora.
4. Validar la implementación del sistema mediante pruebas de llenado, garantizando su funcionalidad y precisión en el proceso de distribución de materiales.

4. MARCO TEÓRICO

En la industria alimentaria, se emplean diversos procedimientos para envasar productos líquidos, y el llenado es una etapa fundamental en las líneas de envasado. Los envases de tereftalato de polietileno (PET) son los más comúnmente utilizados como recipientes de almacenamiento por las empresas del sector.

4.1.1 LLENADORAS DE ENVASES PET

Las máquinas llenadoras de envases tienen como objetivo principal introducir el producto final o líquido en envases de diversas presentaciones para su almacenamiento. Es crucial que la máquina suministre la cantidad precisa de fluido de acuerdo con las dimensiones del envase durante este proceso. Esta etapa de llenado de envases es una de las operaciones fundamentales en la industria de bebidas para envasar productos líquidos.

4.1.2 TIPO DE LLENADO DE ENVASES PET

Los procesos de llenado de envases pueden llevarse a cabo de forma manual, semiautomática o completamente automática, según los requisitos específicos y los recursos económicos disponibles.

Para la etapa de llenado, el factor más determinante para seleccionar el tipo de llenadora es la producción deseada. A continuación, se detallan tres tipos de llenadoras en función de su capacidad y características:

1. Llenadoras de baja capacidad: Estas llenadoras son ideales para empresas con producción reducida, ya que su control es manual. Son utilizadas principalmente por pequeñas empresas que manejan lotes pequeños y desean mejorar sus procesos con equipos sencillos, económicos y compactos. Las ventajas de estas llenadoras incluyen facilidad de limpieza, costo económico y confiabilidad debido a su diseño simple. Sin embargo, su desventaja radica en que la producción depende de la habilidad del operador durante el llenado.



Figura 1. Llenadora baja capacidad. [7]

2. Llenadoras rotativas: Diseñadas para llenar grandes lotes con alta velocidad de producción, estas llenadoras son rígidas y pueden cambiar entre tipos de envases, aunque este proceso puede ser complejo debido a la cantidad de piezas que deben ser reemplazadas, especialmente la mesa rotativa. Aunque tienen costos elevados, estas máquinas no tienen tiempos muertos durante el proceso de llenado.



Figura 2. Llenadora rotativa. [7]

3. Llenadoras lineales: Orientadas a velocidades de producción moderadas, estas llenadoras ofrecen flexibilidad en el montaje y cambio para llenar envases de diferentes presentaciones. Permiten regular la altura de las boquillas según el tamaño del envase, lo que facilita su adaptación. Además, estas llenadoras tienen un costo menor en comparación con las rotativas.



Figura 3. Llenadora lineal. [7]

4.1.3 FORMAS DE LLENADO DE ENVASES PET

Existen diversas formas de llevar a cabo el llenado de envases, cada una utilizando métodos distintos para dirigir el fluido hacia las boquillas de salida en condiciones deseadas. A continuación se describen algunas de las principales formas de llenado:

1. Llenado por gravedad: Este método es uno de los más tradicionales, ya que no requiere de ningún dispositivo externo para llevar a cabo el llenado. El líquido fluye desde un depósito elevado hacia los envases debido a la fuerza de la gravedad.



Figura 4. Llenado por gravedad. [7]

2. Llenado por bomba: En este método, se utiliza una bomba u otro dispositivo externo para impulsar el líquido desde un depósito hacia las boquillas de llenado.



Figura 5. Llenadora por bomba. [7]

3. Llenado por pistones: Similar al llenado por bomba, este método también emplea dispositivos externos para dirigir el fluido hacia las boquillas de llenado. En este caso, el movimiento del fluido se logra mediante el uso de pistones que cargan y descargan el líquido en proporciones iguales.



Figura 6. Llenadora por pistones. [7]

4. Llenado por vacío: Este método proporciona un control preciso del nivel de llenado. El líquido es aspirado hacia el envase a través de una diferencia de presión creada entre el recipiente que contiene el fluido y el interior del envase. En este proceso, no hay contacto del fluido con ninguna bomba, lo que puede ser beneficioso en ciertas aplicaciones.



Figura 7. Llenadora por vacío. [7]

4.2 MECANISMOS DE AVANCE

El mecanismo de avance electromecánico tiene la responsabilidad de desplazar los envases mediante el movimiento de una banda transportadora, la cual es accionada por un motor que se conecta a la banda mediante un sistema de transmisión.

Este mecanismo posibilita el transporte de los envases desde un punto inicial hasta su posición siguiente, deteniéndose en el lugar y en el momento adecuado para permitir el llenado. La velocidad de este mecanismo debe ser moderada para evitar desplazamientos incorrectos de los envases.

El motor encargado de mover el sistema de avance debe tener el torque suficiente para vencer las cargas resistivas e iniciales que se presentan durante el proceso.

4.2.1 TIPOS DE MECANISMOS DE AVANCE

1. Transportador de banda o cinta:

La cinta transportadora se desplaza mediante la fricción entre la banda y unos tambores accionados por un motor, donde la tensión aplicada a la banda es clave para generar dicha fricción. Este tipo de transportador es utilizado principalmente para el traslado de materiales granulados, agrícolas e industriales como cereales, latas, y envases de plástico o vidrio, adaptándose a los parámetros de funcionamiento de toda la línea.



Figura 8. Transportadora por cinta. [7]

2. Transportador de rodillos:

El transportador por rodillos utiliza rodillos para crear una superficie regular que facilita el manejo y transporte de diversos objetos como cajas, paquetes, envases grandes, y para aplicaciones que requieren acumulación de productos.



Figura 9. Transportadora por rodillos. [7]

3. Transportador por placas articuladas:

Las bandas transportadoras de placas articuladas son altamente resistentes al desgaste y poseen una superficie uniforme que permite el traslado de diferentes productos, siendo especialmente útiles en el transporte de envases de vidrio y plástico. Estas placas, ya sea de plástico o acero, son comúnmente utilizadas en líneas de llenado de capacidad media o alta, permitiendo el traslado del producto de una estación a otra, incluyendo curvas. Debido a su eficiencia, este tipo de transporte es ampliamente utilizado en la industria alimentaria.

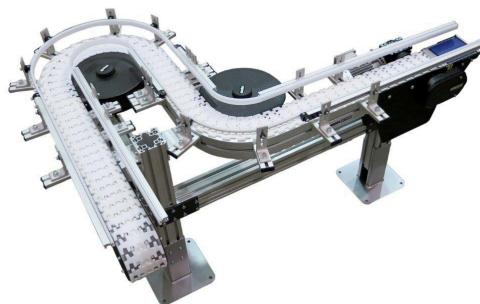


Figura 10. Transportadora por placas articuladas. [7]

4.3 SISTEMA HIDRÁULICO

El sistema hidráulico de la máquina llenadora se encarga del transporte del fluido desde un recipiente de almacenamiento hasta la salida de las boquillas para realizar el llenado de los envases según las necesidades específicas.

Este sistema hidráulico permite trabajar con una amplia gama de fluidos, siendo el agua el más comúnmente utilizado. Las máquinas llenadoras se diseñan en función de los fluidos con viscosidades similares para garantizar que todos los componentes cumplan con los requisitos necesarios.

Las boquillas están diseñadas con una geometría que facilita la deposición del líquido dentro del envase y cuentan con un mecanismo de apertura y cierre que permite el paso del líquido solo durante el proceso de llenado.

4.3.1 ELEMENTOS DEL SISTEMA HIDRÁULICO

1. Tuberías: Encargadas de transportar el fluido desde un recipiente de almacenamiento hasta las boquillas de salida.

2. Válvulas: Responsables de permitir o restringir el flujo del fluido, colocadas estratégicamente a lo largo de las tuberías.

3. Accesorios: Conjunto de piezas que se unen a las tuberías o equipos para garantizar una correcta unión y distribución del fluido.

4. Tanque: Almacena el fluido de trabajo que luego se utiliza para el llenado de los envases. Existen dos tipos de tanques comunes:

4.1 Tanque elevado: Situado a una altura superior al nivel de las boquillas de llenado para aprovechar la presión gravitacional y facilitar el flujo del líquido.

4.2 Tanque cerrado: Sellado herméticamente para evitar la contaminación o pérdida del fluido.

5. Medidores: Realizan lecturas como la presión y el caudal, proporcionando un mejor control del sistema.

6. Boquillas: Dispositivos en contacto directo con los envases, controlan el flujo del fluido y permiten obtener parámetros específicos de llenado.

7. Accesorios adicionales: Incluyen codos, sellos, llaves de cierre, uniones, etc., que cumplen funciones diversas como restringir el flujo, direccionar el fluido o prevenir fugas.

8. Bomba: Elemento principal del sistema hidráulico, proporciona la energía necesaria para mover el fluido a través de las tuberías.

Las bombas de desplazamiento positivo o volumétricas funcionan mediante volúmenes confinados, transfiriendo energía de presión al fluido. Esto se logra mediante el llenado y vaciado periódico de una serie de cámaras, lo que permite el trasiego de cantidades discretas de fluido desde la aspiración hasta la impulsión.

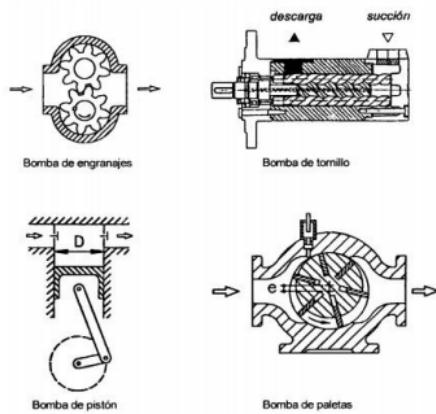


Figura 11. Tipos de bombas de desplazamiento positivo. [7]

Por otro lado, las turbo bombas ceden energía al fluido al variar el momento cinético generado en el impulsor o rodetes. La dirección del flujo de salida del rodetes determina su clasificación específica.

4.4 MECANISMOS DE AVANCE LINEAL

Los mecanismos de avance lineales son dispositivos utilizados para desplazar objetos de manera lineal en un sistema mecánico.

Existen varios tipos de mecanismos de avance lineales, cada uno con sus propias características y aplicaciones específicas:

1. Husillo de bola (Ball Screw): Consiste en un husillo roscado que se acopla con una tuerca que contiene bolas entre el husillo y la tuerca. Cuando el husillo gira, las bolas hacen que la tuerca se desplace a lo largo del husillo, proporcionando un movimiento lineal suave y de alta precisión.



Figura 12. Husillo de bola. [7]

2. Tornillo de avance (Lead Screw): Similar al husillo de bola, pero en lugar de bolas, la tuerca se desplaza a lo largo del husillo mediante un rosca helicoidal. Es menos eficiente y preciso que el husillo de bola, pero es más económico y adecuado para aplicaciones de carga ligera.



Figura 13. Tornillo de avance. [7]

3. Cilindros neumáticos y cilindros hidráulicos: Utilizados en sistemas de potencia fluida, estos actuadores lineales utilizan aire comprimido o fluido hidráulico para generar fuerza y desplazar un pistón lineal dentro de un cilindro. Son adecuados para aplicaciones que requieren fuerzas significativas y pueden proporcionar velocidades de desplazamiento variables.



Figura 14. Cilindro neumático. [7]

4. Actuadores lineales eléctricos: Estos dispositivos convierten la energía eléctrica en movimiento lineal. Pueden incluir motores de corriente continua, motores paso a paso o motores de corriente alterna, y utilizan sistemas como tornillos de avance, correas dentadas o sistemas de piñón-cremallera para convertir el movimiento rotativo del motor en movimiento lineal.



Figura 15. Actuador lineal. [7]

4.5 SENSORICA MEDICIÓN DE NIVEL DE AGUA

1. Sensores de Flotador:

Principio de Funcionamiento: Utilizan un flotador que se mueve con el nivel del agua. Este movimiento se traduce en una señal eléctrica.

Ventajas: Simplicidad, bajo costo, facilidad de instalación.

Desventajas: Mantenimiento frecuente, no apto para ambientes sucios o corrosivos.



Figura 16. Flotador. [10]

2. Sensores Ultrasónicos

Principio de Funcionamiento: Emiten pulsos ultrasónicos que rebotan en la superficie del agua. El tiempo que tarda el pulso en regresar se utiliza para calcular el nivel de agua.

Ventajas: Sin contacto con el agua, precisión, adecuado para ambientes corrosivos.

Desventajas: Afectados por la temperatura y la presión, costo relativamente alto.



Figura 17. Sensor ultrasónico. [10]

3. Sensores de Presión

Principio de Funcionamiento: Miden la presión ejercida por la columna de agua sobre un sensor. La presión se convierte en una señal eléctrica proporcional al nivel de agua.

Ventajas: Precisión, no afecta la temperatura, adecuados para grandes profundidades.

Desventajas: Necesidad de calibración, mantenimiento regular, susceptibles a obstrucciones.



Figura 18. Sensor MPX. [10]

4. Sensores Capacitivos

Principio de Funcionamiento: Miden los cambios en la capacitancia causada por el nivel del agua entre dos placas metálicas.

Ventajas: Sin contacto, alta precisión, aplicable a diferentes tipos de líquidos.

Desventajas: Sensibles a la acumulación de suciedad, costo más alto.



Figura 19. Sensor Inductivo. [10]

5. Sensores Ópticos

Principio de Funcionamiento: Utilizan un haz de luz para detectar el nivel de agua. El haz se interrumpe o se refleja en la superficie del agua, lo que cambia la señal recibida por el sensor.

Ventajas: Sin contacto, alta precisión, adecuados para líquidos claros y limpios.

Desventajas: Afectados por turbidez, suciedad en el sensor, relativamente costosos.

Tipos de Sensores para Medición de Flujo de Agua

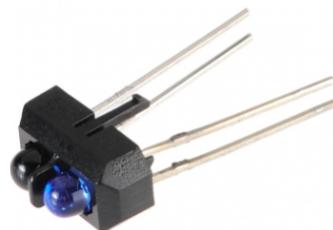


Figura 20. Sensor óptico. [10]

6. Medidores de Flujo Mecánicos

Principio de Funcionamiento: Utilizan una rueda de paletas o un rotor que gira con el flujo de agua. La velocidad de rotación se convierte en una señal proporcional al caudal.

Ventajas: Simplicidad, bajo costo, facilidad de instalación.

Desventajas: Desgaste mecánico, mantenimiento frecuente, no adecuados para agua sucia o con partículas.



Figura 21. Sensor de flujo. [10]

ESTADO DEL ARTE			
TÍTULO	AUTOR	RESUMEN	APORTE AL PROYECTO
ANALYSIS OF THE TORQUIMETRY OF A CAPSULING MACHINE AND TORQUE STANDARDISATION. 2019	Ryan Leon Leon, Nicole Guevara Jimenez, Miguel Castillo Seminario, Luis Sedano Ibañez, Eduardo Castro Soto	En este estudio se realizará el análisis y el desarrollo de una estandarización del torque usado para el sellado de botellas de refrescos, con el fin de ayudar a las empresas dedicadas a la producción de botellas de refrescos a obtener un sellado que cumpla los estándares de calidad a través de la aplicación de una sola medida para todas las diferentes presentaciones y volúmenes de botellas y tapas de refrescos.	Mediante el siguiente artículo de investigación de la Universidad Privada del Norte de Perú, se obtiene información crucial para el cálculo y la estandarización del torque necesario para el enroscado de las botellas de agua de 1 litro y otras posibles presentaciones.
PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA MÁQUINA LLENADORA DE ENVASES PET. 2021	ALEXANDER ERNESTO CORTEZ ESPINOZA, EDGAR JOSUÉ PARADA ZELAYA, ADIEL ISAÍ VALENCIA CHÁVEZ	En el presente trabajo se ha realizado una propuesta de diseño de una máquina para la etapa de llenado de envases PET. Se presentan los cálculos para el diseño de los elementos más importantes de la máquina y otros elementos serán seleccionados de catálogo.	A través de la siguiente tesis de pregrado de la Universidad de El Salvador, se puede acceder a información vital para determinar la metodología de los cálculos más relevantes en nuestro proyecto. Esto incluye la determinación de la aceleración máxima de la banda transportadora y el factor de seguridad para el actuador lineal en la etapa de enroscado.
DESIGN OF AN	Jessica Gisella	Actualmente, la mayoría	A través del siguiente

AUTOMATIC SYSTEM FOR BOTTLING AND SEALING BOTTLES FOR JUICES OF 250 MM3. 2022	Maradey-Lázaro, Arly Darío Rincón-Quintero, Jhon Alexander Caballero-Moreno, Gustavo Andrés Castellanos-Gómez, Camilo Leonardo Sandoval Rodriguez	de los procesos de producción en la industria alimentaria requiere niveles de automatización altos, dada la precisión y el tiempo total consumido son las principales variables que influencian los costos de fabricación, la productividad, la competitividad y la satisfacción de los clientes. Este artículo pretende mostrar el diseño de un prototipo de sistema automático para embotellado y sellado de botellas específicamente de 250 mm ³ incluyendo la definición de criterios de selección basados en el presupuesto planeado.	artículo de investigación de la UNAB en colaboración con la UTS, se presenta un diseño preliminar de la etapa de colocación de la tapa sobre la botella plástica. Este diseño, plasmado en un modelo CAD proporcionado en el artículo, sirve como inspiración y referencia clave para el diseño y adaptación de esta etapa en nuestro propio proyecto.
DESARROLLO DE LA AUTOMATIZACIÓN DE UN PROCESO DE LLENADO Y PALETIZADO DE BOTELLAS DE ACEITE Y DEL GEMELO DIGITAL DE ÉSTE MEDIANTE EL SOFTWARE FACTORY IO. 2023	Valero Gallar, Sergio	El objeto de este proyecto es diseñar y automatizar un proceso de llenado y paletizado de botellas de dos tipos de aceite diseñando su gemelo digital mediante el Software Factory IO de forma que la producción pueda ser controlada desde el panel de control de la nave industrial. Slave device.	Mediante este proyecto de grado se buscó información sobre la posible implementación de un gemelo digital de una embotelladora en el software de Faactory IO

5. DESCRIPCIÓN PROPUESTA DE SOLUCIÓN

La propuesta preliminar para el desarrollo del proyecto integrador consiste en dividir el proceso de llenado de botellas en tres etapas principales.

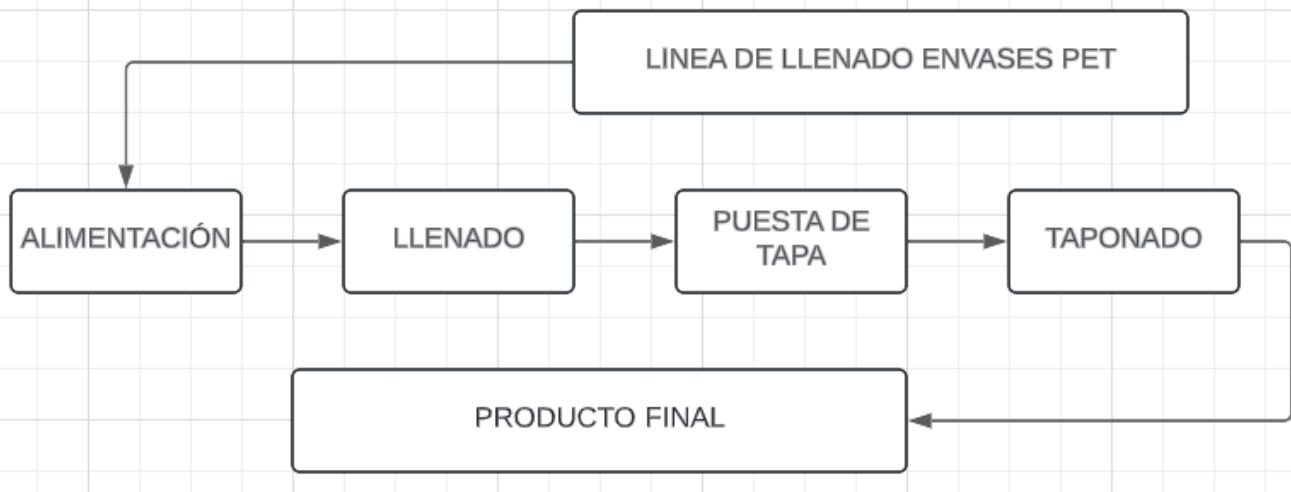


Figura 22. Diagrama de la propuesta de solución. [Imagen propia]

La primera etapa implica el llenado de la botella plástica con agua. Se requiere un tanque de almacenamiento, una bomba de agua, un sensor infrarrojo, un sensor ultrasónico y las mangueras correspondientes. Cuando el sensor infrarrojo detecta la botella plástica, envía una señal para detener la banda transportadora. Luego, la bomba de agua se activa para llevar el agua desde el tanque hasta la botella. Simultáneamente, mediante el cálculo del nivel de agua en el tanque con un sensor ultrasónico, se determina la cantidad de agua dispensada en la botella. Utilizando un modelo matemático, se diseña un controlador que regula el ancho del pulso modulado (PWM) suministrado a la bomba de agua, garantizando un llenado preciso.

La segunda etapa se centra en la colocación de la tapa sobre la botella de plástico ya llena de agua. En este caso, se desarrolla un diseño mecánico que aprovecha el movimiento lineal con el que la botella se aproxima a esta etapa. El objetivo es colocar la tapa sin que se vuelque, utilizando la información investigada en el estado del arte.

La tercera etapa es la más compleja y crítica. Involucra dos momentos cruciales: primero, el movimiento lineal para sostener la tapa de la botella plástica, y segundo, la aplicación del torque necesario para sellar la botella. Para esto, se necesita diseñar un actuador lineal y una estructura para este actuador. Se requieren dos motores, uno para el actuador y otro que aplique el torque necesario para el sellado. Además, se necesita un sensor infrarrojo que permite alinear la botella de agua con el actuador lineal, facilitando todo el proceso.

6. METODOLOGÍA DE DISEÑO DE INGENIERÍA

La metodología de diseño en V, también conocida como "modelo en V", es un enfoque utilizado en ingeniería para el desarrollo y la gestión de proyectos,

Esta metodología se basa en la idea de que cada fase de desarrollo debe tener una correspondencia directa con una fase de verificación y validación. Es decir, que para cada etapa de diseño o desarrollo, existe una etapa complementaria de pruebas o verificación para asegurar que los requisitos se cumplen adecuadamente.

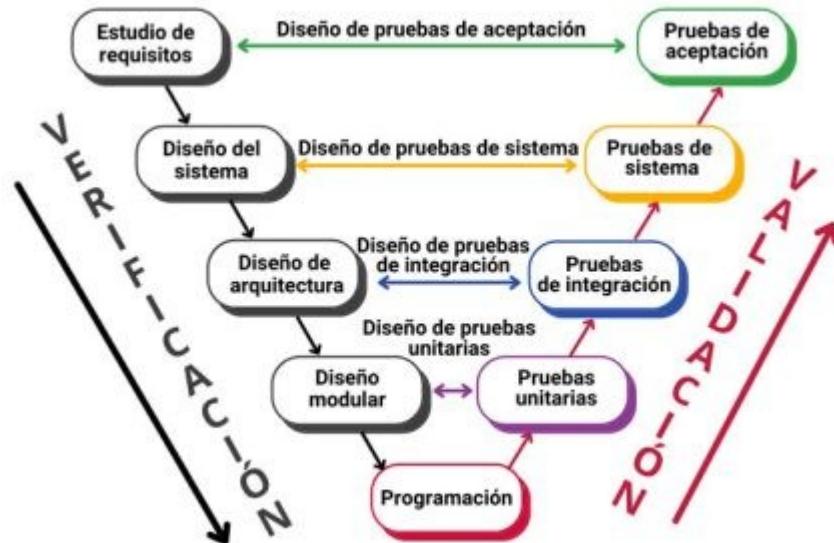


Figura 23. Metodología de diseño de ingeniería. [Imagen propia]

ACTIVIDADES	SEMANA								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Estado del arte, investigación									
Cálculos y diseños preliminares									
Impresión actuador lineal y posteriores ajustes									
Parametrización sensores y actuadores									
Diseño y implementación controlador llenado de botella plástica con agua									
Primera presentación de avances									

Tabla 1. Cronograma de actividades. [Tabla propia]

7. DISEÑO MECÁNICO

El diseño mecánico se divide en dos etapas: la colocación de la tapa y el sellado. Para lograr una finalización precisa en ambas etapas, es fundamental desarrollar un diseño que se adapte perfectamente a las necesidades específicas del proceso.

Etapa colocación de la tapa:

Esta etapa se considera la menos exigente, ya que una vez que la botella se ha llenado y atraviesa este proceso, automáticamente se colocará la tapa.

En el diseño, se consideraron ciertos criterios específicos.

La pieza que alberga la tapa está inclinada a un ángulo de 25 grados, lo que facilita que la tapa se coloque en la botella automáticamente durante el proceso. Este ángulo se seleccionó tras consultar un artículo especializado en el tema presente en el estado del arte.

Para optimizar nuestro proceso diseñado para múltiples botellas, es esencial contar con un área dedicada para almacenar hasta 10 tapas. Además, debemos incorporar pivotes que ajusten la altura de nuestras piezas de acuerdo con la altura de la botella.

Diseño propuesto de la etapa colocación de la tapa:

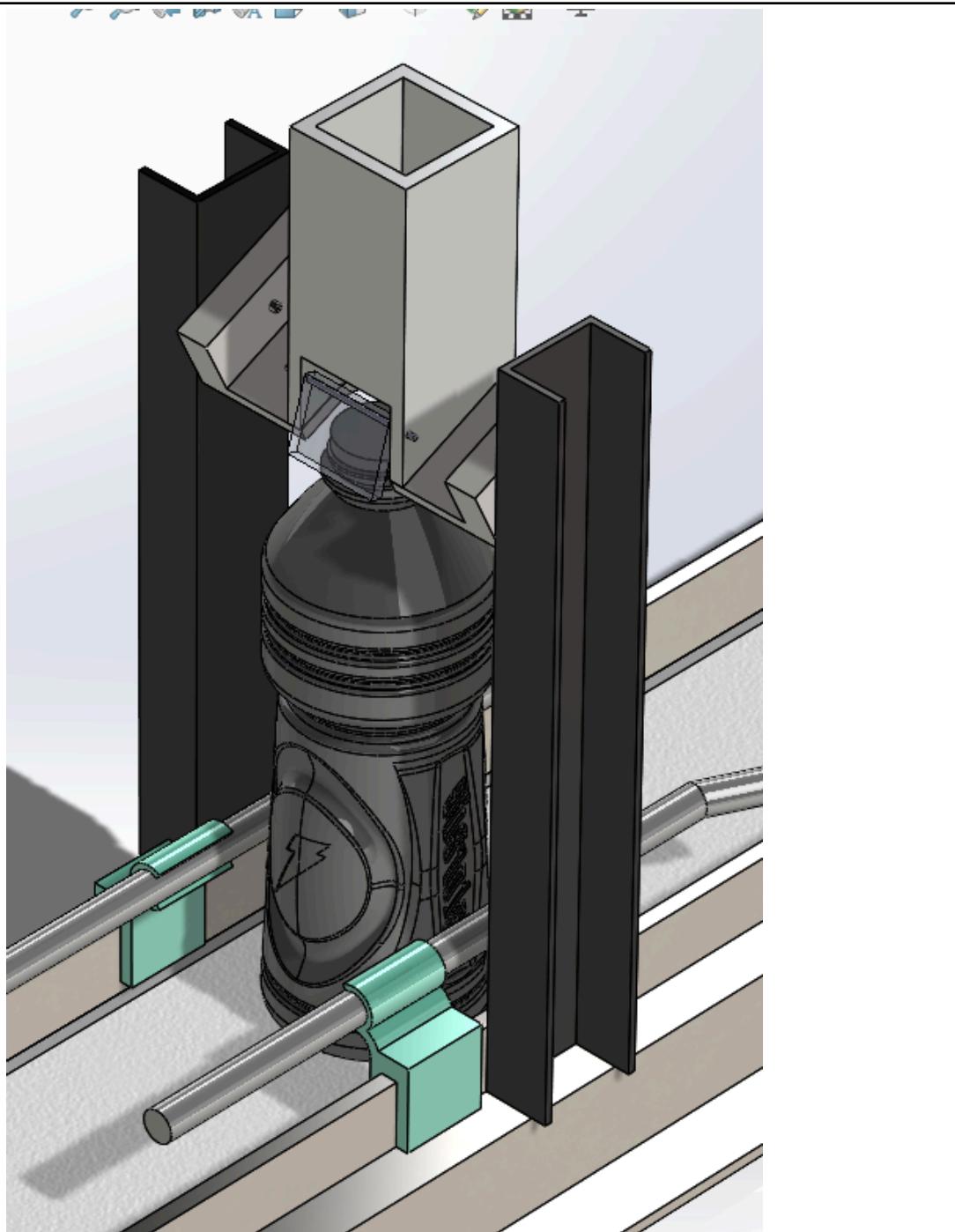


Figura 24. Diseño propio de etapa de colocación de tapa. [Imagen propia]

Etapa enroscado:

Este diseño presenta la mayor problemática en cuanto a requerimientos, ya que debe soportar un peso constante y además resistir el torque generado durante el enroscado. Por lo tanto, es fundamental contar con una estructura más robusta para garantizar su estabilidad y durabilidad.

Otro criterio importante que se consideró es la altura de la estructura. Esta se diseñó para ser considerablemente más alta que la botella, lo que permite que el actuador lineal pueda moverse sin ninguna restricción, facilitando así el funcionamiento del motor que enrosca la tapa.

Para lo referente al enroscado, se basó en la investigación ofrecida por el artículo "ANALYSIS OF THE TORQUIMETRY OF A CAPSULING MACHINE AND TORQUE STANDARDISATION" la cual busca un valor de torque necesario para enroscar envases PET comerciales, teniendo en cuenta esto se llega a la conclusión que el torque mínimo debe ser 10 [in-lb].

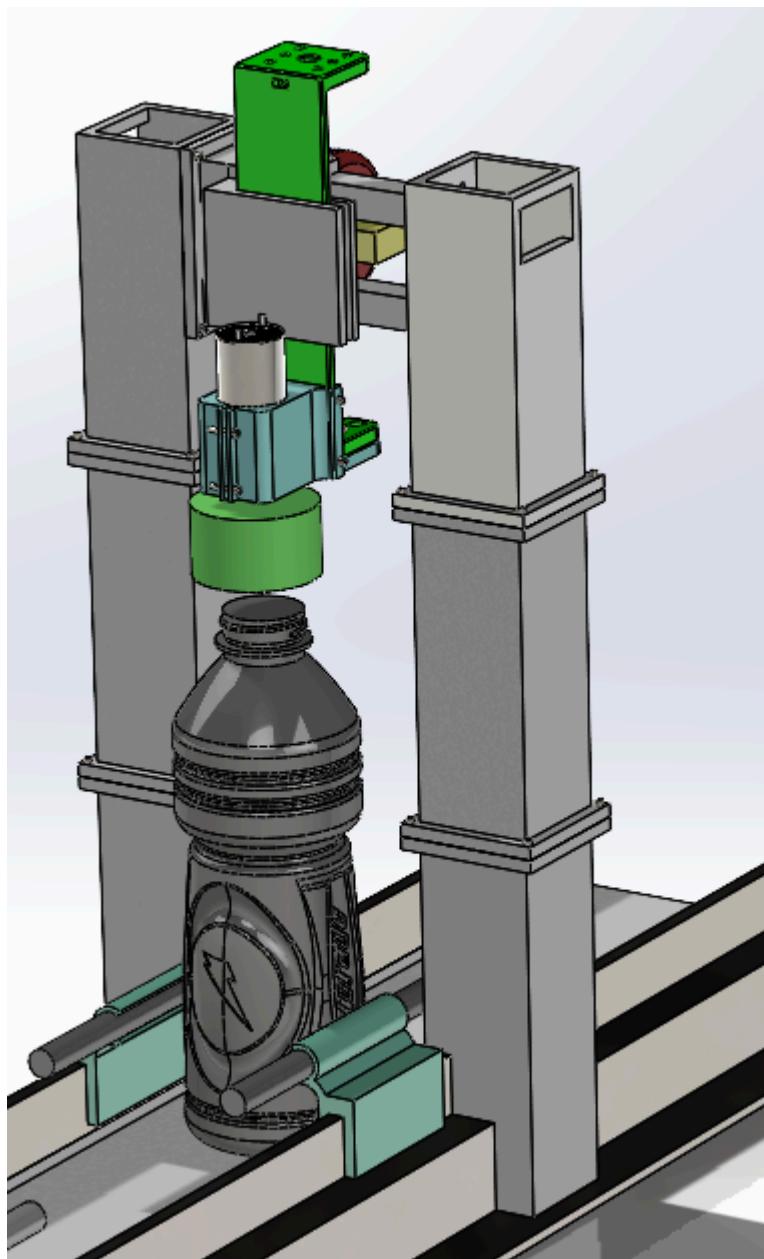


Figura 25. Diseño propio de enroscado de tapa. [Imagen propia]

Con el fin de no realizar un sistema de control para el actuador lineal que se encarga de subir/bajar el motorreductor encargado del roscado se utiliza un juego de servomotor/mecanismo, de esta manera con un giro de 180° mover siempre la misma distancia.

$$\begin{aligned}
 L &= r * \theta \\
 L &= 2.5 \text{ [cm]} * \pi \text{ [rad]} \\
 L &= 7.85 \text{ [cm]}
 \end{aligned}$$

L: Longitud de arco [cm]

r: radio piñón [cm]

theta: ángulo servo [rad]

Ec 1. Cálculos de longitud de arco con piñón y theta fijo.

Dado que el theta máximo al que puede llegar el servo es pi, el único valor que podemos variar para obtener una longitud de arco permisible es el radio. El mejor valor de radio teniendo en cuenta el torque del motor y el delta de X fue un radio de 2.5 [cm], pensando en la modularidad del sistema.

Consideraciones:

- Para evitar realizar un controlador del actuador linear, se usará un servo conectado a un mecanismo piñón/cremadera, de esta manera tendrá una distancia fija para cada valor de grado.
- El servo debe tener el torque para mover el peso del motor y del mecanismo.
- El servo debe ser de 180° de movimiento.

Una vez definido el radio del piñón del mecanismo es necesario calcular el torque que debe tener el servo para mover el peso del mecanismo y el motorreductor.

$$\begin{aligned}
 m_{total} &= 40 \text{ [g]} + 180 \text{ [g]} = 0.220 \text{ [Kg]} \\
 F &= 0.220 \text{ [Kg]} * 9.88 \text{ [m/s}^2\text{]} = 2.19 \text{ [N]} \\
 T_{servo} &= 0.025 \text{ [m]} * 2.19 \text{ [N]} \\
 T_{servo} &= 0.0054 \text{ [N * m]} = 5.4 \text{ [Kg * cm]}
 \end{aligned}$$

Ec 3. Cálculos de torque servomotor.

Antes de concebir la estrategia de control, es imperativo establecer los criterios de operación de la banda transportadora. Como se indicó previamente, la intención es transportar botellas de 22.2 [cm] de altura aprox.. Por lo tanto, se requiere especial atención a la aceleración inicial al pasar de reposo a movimiento. De manera similar, el sistema debe reaccionar con prontitud cuando se solicite una velocidad específica. Los criterios establecidos son los siguientes:

1. Implementar acciones de control suaves.
2. Lograr tiempos de establecimiento en torno a 1 segundo.
3. Obtener respuestas transitorias que exhiban comportamientos sobrearmortiguados.

Antes de diseñar la estrategia de control de velocidad para la banda transportadora debemos definir la aceleración máxima de la banda para evitar el volteo o deslizamiento. Este análisis se realiza cuando la botella está vacía dado que sería el punto crítico.

PARÁMETRO	VALOR
Gravedad [m/s ²]	9.8
Masa envase PET vacío [Kg]	0.031
Altura envase PET [m]	0.22
Diámetro envase PET [m]	0.062
Coeficiente de fricción estático [μ_s] tomado de [6]	0.20
Peso envase PET [N]	0.3038

Tabla 2. Parámetros botella de agua. [Tabla propia]

Análisis de deslizamiento:

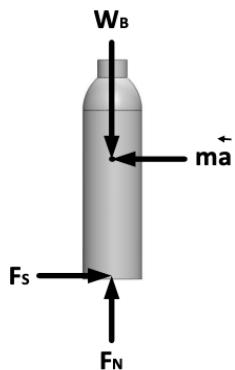


Figura 26. DCL análisis estático deslizamiento. [Imagen propia]

$$\sum F_y = 0$$

$$F_N = W_B$$

$$\sum F_y = m * a$$

$$F_s = m * a$$

Ec 2. Ecuaciones estáticas de deslizamiento.

La fuerza de fricción estática se toma en cuenta como el umbral máximo para mantener el envase en reposo. Luego, este valor se inserta en la Ec. 8.2 para calcular la máxima aceleración que podría causar deslizamiento.

$$F_s = \mu s * F_n$$

$$F_s = 0.06076 [N]$$

Ec 9. Ecuaciones de fricción estática.

$$ab = \frac{mb}{F_s} = \frac{0.06076 [N]}{0.031 [Kg]} = 1.96 [m/s^2]$$

Ec 10. Ecuaciones de aceleración máxima de deslizamiento.

Análisis de volteo:

Para analizar el volteo, se evalúa la fuerza F_v aplicada en el centro de gravedad del envase. Esta fuerza, conocida como fuerza de volteo, es la que el envase experimenta debido a la aceleración de la banda transportadora.

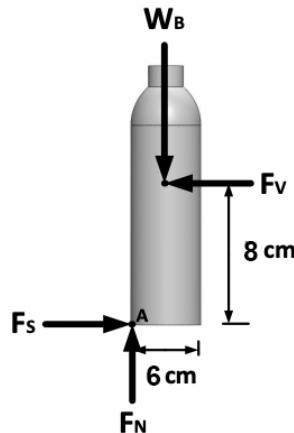


Figura 27. DCL análisis momentos volteo. [Imagen propia]

$$\sum Ma = 0$$

$$\sum Ma = (Fv)(0.08) - (Wb)(0.03)$$

Ec 11. Ecuaciones de momentos de volteo.

$$Fv = 0.1139 [N]$$

$$Fv = mb * ab$$

Ec 12. Ecuaciones de fuerza de volteo.

$$ab = \frac{Fv}{mb} = \frac{0.1139 [N]}{0.031 [Kg]} = 3.657 [m/s^2]$$

Ec 13. Ecuaciones de aceleración máxima de volteo.

Dado que la banda transportadora tiene una velocidad lineal máxima de 0.32 [m/s], al partir del reposo hasta su velocidad máxima en 1 segundo alcanza una aceleración máxima de 0.32 [m/s²]. Bajo ninguna condición habrá desplazamiento o volteo en los envases PET.

Para verificar el correcto funcionamiento de la estructura, se realizó un Análisis de Elementos Finitos (FEA) con el fin de determinar si nuestra estructura es capaz de soportar la fuerza generada por el motor. Para ello, se creó un ensamblaje en SolidWorks que incluye todas las piezas que permanecerán estáticas cuando el motor esté en funcionamiento. Se asignaron materiales a los diferentes componentes, y en nuestro caso, todo fue realizado con impresión 3D utilizando material ABS. A continuación, se identificaron las restricciones aplicadas a los soportes conectados a la banda y, por último, se aplicó la fuerza generada por el motor para el análisis.

Resultados del Análisis:

El análisis de Elementos Finitos (FEA) realizado en la estructura revela que, en su mayoría, la pieza no presenta puntos críticos de tensión. La gráfica de von Mises muestra que las tensiones distribuidas están dentro de los límites seguros, indicando que la estructura es capaz de soportar la fuerza generada por el motor sin riesgo de falla o deformación plástica significativa. Solo se observaron algunas zonas con tensiones más elevadas, pero estas permanecen por debajo del límite de fluencia del material ABS utilizado en la impresión 3D. Por lo tanto, se puede concluir que la estructura es adecuada y segura para su uso en las condiciones de carga previstas.

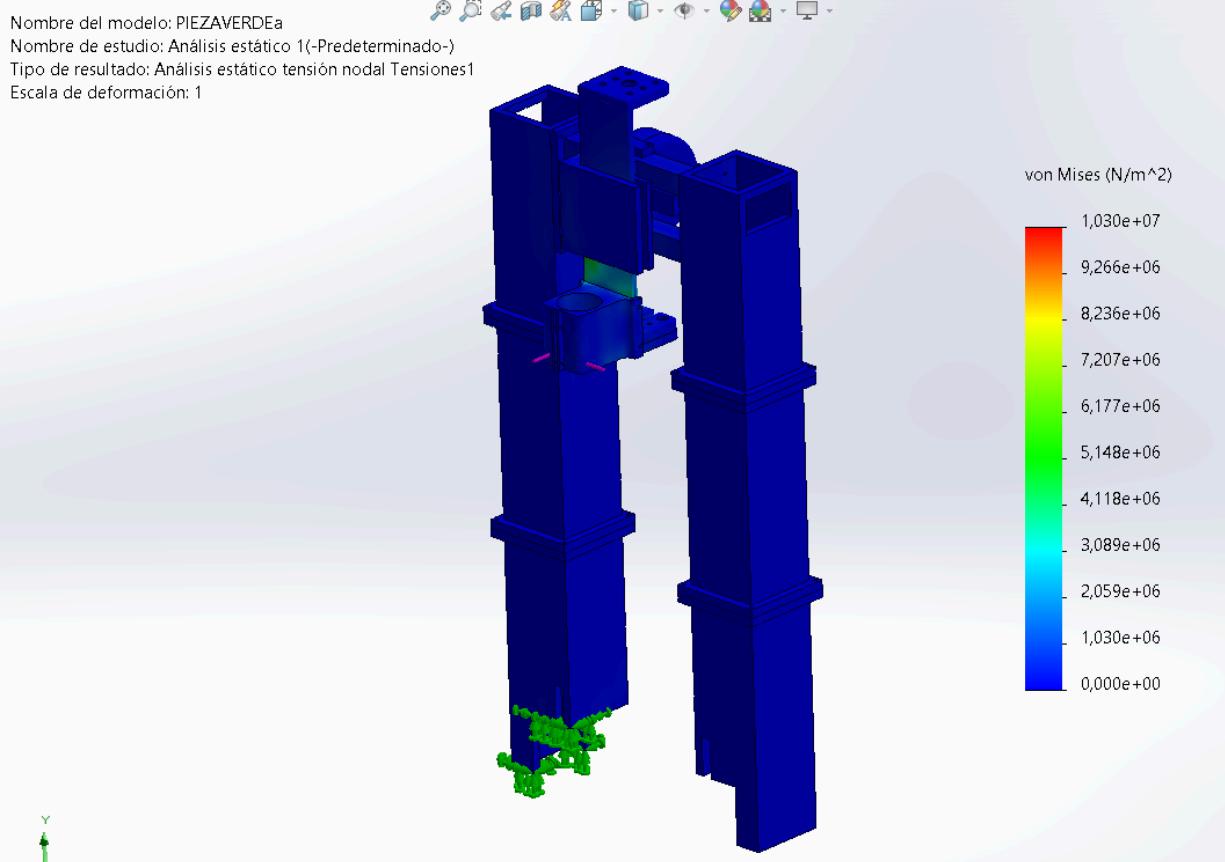


Figura 28. Esfuerzos de von Mises (N/m²) tercera etapa. [Imagen propia]

Al realizar el análisis obtuvimos que en la mayor parte de nuestra estructura tendrá un factor de seguridad de 2,5 algo bueno considerando que nuestra estructura no manejara esta fuerza durante demasiado tiempo.

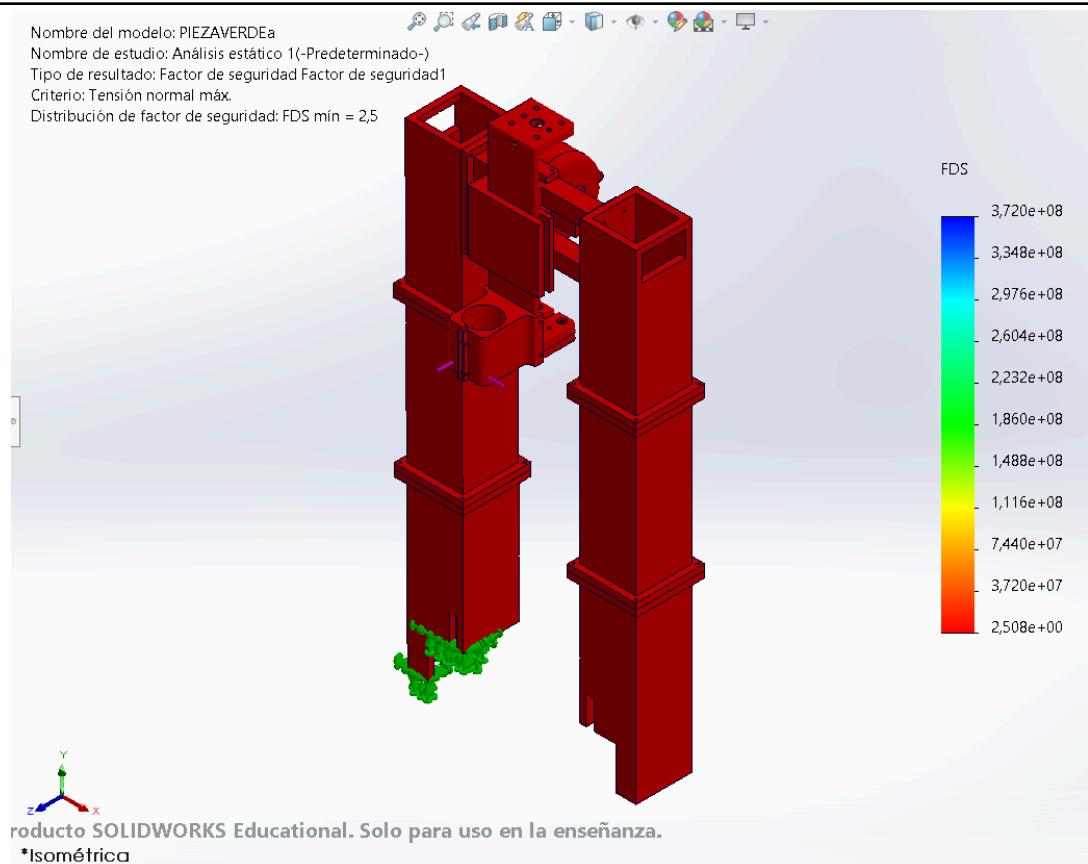


Figura 29. Factor de seguridad tercera etapa. [Imagen propia]

El segundo ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS (FEA) realizado en los rieles y el soporte de los rieles ha arrojado resultados. Con un factor de seguridad de 5.6, se confirma que los rieles son completamente capaces de soportar el torque aplicado a la botella, lo que demuestra una robustez excepcional en su diseño. Este alto factor de seguridad sugiere que los rieles y su soporte están bien dimensionados y son adecuados para resistir las fuerzas generadas por el movimiento de la botella. En resumen, los resultados del análisis validan la capacidad de los rieles para mantener la botella estática bajo la influencia del torque aplicado, lo que garantiza un rendimiento confiable y seguro del sistema en su conjunto.

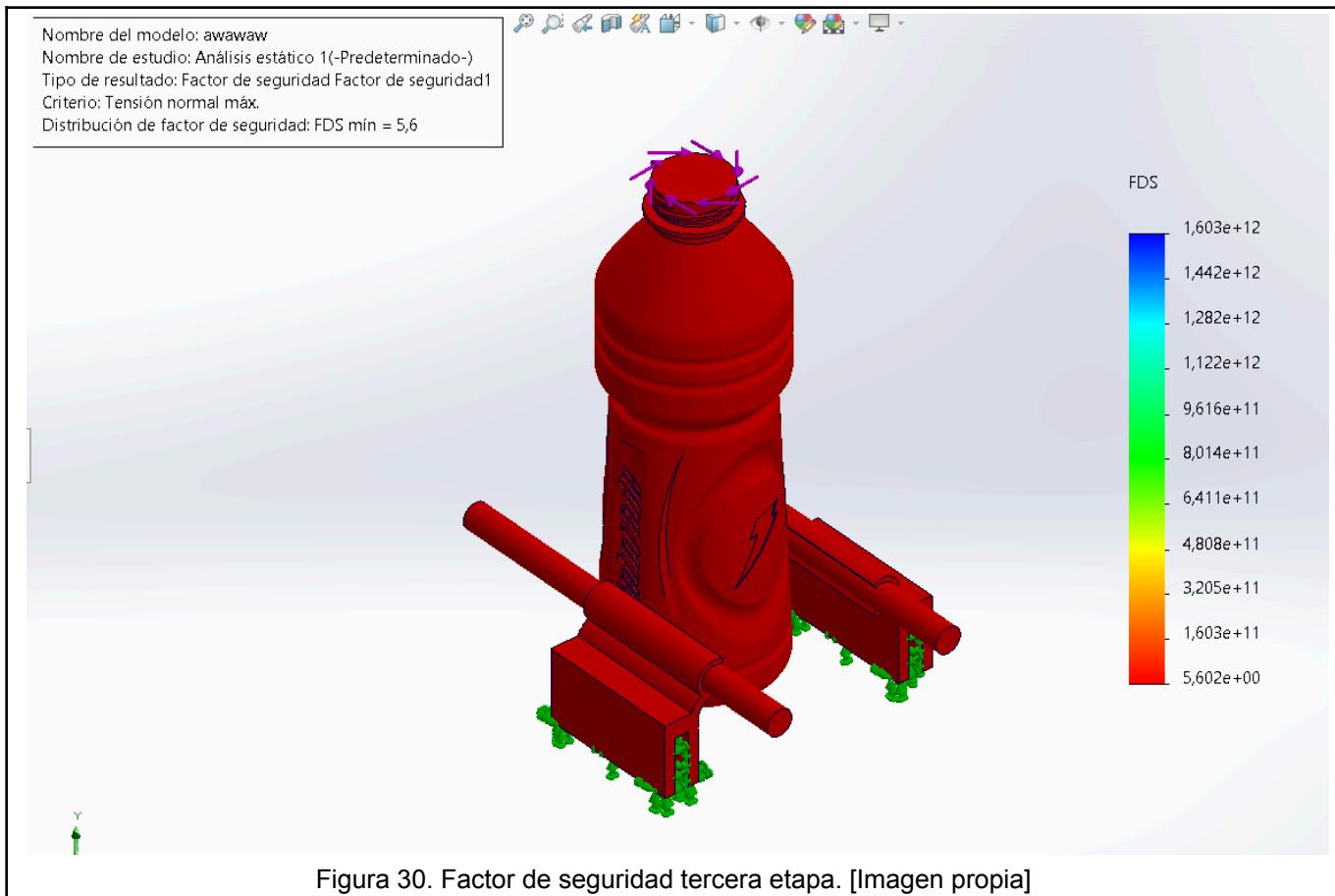


Figura 30. Factor de seguridad tercera etapa. [Imagen propia]

8. DISEÑO ELECTRÓNICO DEL SISTEMA

PRIMERA ETAPA

Dado que la primera etapa se encarga del llenado de las botellas plásticas de agua, se quieren varios componentes para este fin, entre estos se encuentra una bomba de agua, sensor de nivel/flujo de agua, sensor para detección y un driver para la bomba de agua.

Para la bomba de agua, como se definió anteriormente se trabajará mediante llenado por bomba y en este caso se revisarán bombas de desplazamiento positivo.

Consideraciones:

- La altura a la cual la bomba debe desplazar el fluido son 114 [cm].
- El líquido a transportar será agua.
- El líquido solo se transportará por mangüeras plásticas del tamaño de $\frac{1}{4}$ [in]
- El único accesorio adicional será una boquilla con Kperdida = 1.0

Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")			
				Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Mini bomba de agua de 2L-8V	Mini bomba de agua de gran flujo con Motor 370	Mini bomba para fuente 2m 500L
1	1	22,5	9,0	Succión 114cm	▲	▲	▲
2	9	17,5	7,0	Bajo precio	○	▲	○
3	3	10,0	4,0	Bajo consumo de corriente y voltaje	○	○	○
4	3	12,5	5,0	Disponibilidad	○	○	○
5	9	17,5	7,0	Salida de 1/4"	○	○	○
6	9	20,0	8,0	Diseño adaptable	○	○	○

Tabla 3. Matriz QFD bomba de agua. [Tabla propia]

Después de revisar distintas opciones por medio de la matriz QFD, se llega a la conclusión que la mejor opción para este proyecto es adaptar un dispensador de agua comercial.

Weight : 330g



Figura 31. Bomba de agua comercial. [8]

ESPECIFICACIONES	
Voltaje de operación	3.3 - 12 [V]
Corriente nominal	<2000 [mA]
Succión máxima	2 [m]
Diámetro entrada/salida	1/4 [in]
Caudal nominal a 9V	31 [ml/s]

Tabla 4. Especificaciones bomba de agua. [Tabla propia]

Para controlar el PWM de la bomba de agua se hace necesario el uso de un driver para motor DC, en este caso se barajan varias opciones y se realiza la matriz QFD.

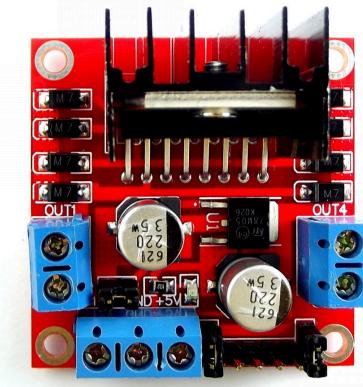
Consideraciones:

- Se busca un tamaño reducido para unificar la estructura de la bomba de agua junto con su driver controlador.

Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")			
				Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	DRIVER L298N	DRIVER L293D	DRIVER L298H
1	9	20,4	10,0	Soporta picos de corriente	▲	○	○
2	9	16,3	8,0	Alta eficiencia	○	▲	○
3	9	12,2	6,0	Tamaño reducido	○	○	○
4	3	16,3	8,0	Precio	▲	○	○
5	3	14,3	7,0	Entrada de PWM	○	○	○
6	3	20,4	10,0	Posibilidad de controlar dos motores	▲	○	○

Tabla 5. Matriz QFD driver motor. [Tabla propia]

Para controlar el PWM de la bomba de agua se hace necesario el uso de un driver para motor DC, en este caso se barajan varias opciones y se realiza la matriz QFD. Se concluye que la mejor opción es la ya conocida como driver puente H L298N, usada en proyectos anteriores.



Chip: L298N
Canales: 2 (soporta 2 motores DC o 1 motor PAP)
Voltaje lógico: 5V
Voltaje de potencia (V motor): 5V - 35V DC
Consumo de corriente (lógico): 0 a 36mA
Capacidad de corriente: 2A (picos de hasta 3A)
Potencia máxima: 25W
Dimensiones: 43 * 43 * 27 mm
Peso: 30g

Figura 32. Puente H L298N / Especificaciones técnicas. [8]

Para monitorear el volumen de agua de la botella existen distintas opciones de sensores, pero se debe tener en cuenta varias consideraciones.

Consideraciones:

- Para garantizar un llenado correcto se debe priorizar la exactitud.
- El rango de operación del caudal lo define la bomba y debe estar entre [8,31] ml/s.
- El sensor no debe ser sensible a ruido o perturbaciones.

Row #	Max Relationship Value in Row	Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")							
		Relative Weight	Weight / Importance	Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "whats")	SENSOR DE PRESION MPX2050	SENSOR FILOTADOR	SENSOR DE FLUJO DE AGUA	SENSOR ULTRASONICO HC-SR04	SENSOR INFRAROJO TCR5000
1	9	23,8	10,0	Salida analoga de 5V	▲	○	▲	▲	▲
2	9	21,4	9,0	Exactitud en la señal de salida	▲	○	▲	○	○
3	9	14,3	6,0	Bajo precio	○	○	○	▲	▲
4	3	14,3	6,0	Difícil de perturbar	○	▲	▲	○	○
5	9	16,7	7,0	Facil de instalar	○	▲	○	○	○
6	3	9,5	4,0	Disponibilidad	▲	○	○	○	○

Tabla 6. Matriz QFD sensor de nivel/flujo. [Tabla propia]

Después de realizar la matriz QFD se llegó a la conclusión que la mejor opción para esta aplicación es el sensor de flujo YF-S04 1/4 el cual trae beneficios interesantes como la posibilidad de usar su salida como boquilla, su fácil instalación dado el diámetro de salida y entrada de 1/4 [in].



Tensión de trabajo: 5V

Corriente de funcionamiento Máx.: 10mA (5V).

Presión Máx.: 0,8MPa.

Caudal de trabajo: 0,3 - 6 L/m.

Rango de humedad de funcionamiento: 35% - 90% RH

Diámetro de los conectores: 7mm aprox.

Diámetro de los conectores: 1/4"

Temperatura de funcionamiento: -25°C a +80°C.

Figura 33. YF-S04 / Especificaciones técnicas. [8]

Por último, para la detección de la botella de agua en las distintas etapas de todo el sistema se requiere el uso de un sensor que detecte la posición de esta.

Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")				
				DEMANDED QUALITY (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	SENSOR ULTRASONICO HC-SR04	SENSOR CAPACITIVO ZC12L	SENSOR INFRARROJO TCR500	SENSOR DE MOVIMIENTO PIR
1	3	23,1	9,0	Precisión en la señal de salida	○	▲	○	○
2	9	20,5	8,0	Rapidez en la detección	▲	▲	▲	○
3	9	25,6	10,0	Voltaje analogo de salida 5V max	▲	○	▲	▲
4	9	17,9	7,0	Bajo precio	▲	○	▲	○
5	9	12,8	5,0	Difícil de perturbar	○	▲	▲	○

Tabla 7. Matriz QFD sensor de detección. [Tabla propia]

Una vez realizada la matriz QFD se llegó a la conclusión que el mejor método de detección de botellas era un sensor infrarrojo, se barajó la opción inicial de usar un TCR5000, gracias a la metodología de trabajo en V después de realizar unas pruebas se confirma que este no ofrece una la fiabilidad necesaria, por ende se decide usar un sensor infrarrojo BR100-DDT-P siendo este más robusto.



- **Alimentación:** 12 – 24VDC
- **Alcance:** 100mm
- **Tipo de luz:** Infrarroja
- **Tipo de lentes:** Fijos
- **Salidas digitales:** 1 PNP
- **Modos de operación:** Light ON / Dark ON
- **Sensibilidad:** Ajustable
- **Forma de uso:** N/A
- **Tipo de conexión:** Cable
- **Estilo constructivo:** Una pieza

Figura 34. BR100-DDT-P / Especificaciones técnicas. [8]

TERCERA ETAPA

Para lo referente al motor encargado del enroscado, de acuerdo con los cálculos previos se estima que se requiere un torque de 10 [lb-in] para enroscar el envase PET 500ML, teniendo en cuenta esto y en busca de economía en el proyecto se decide aplicar la metodología de diseño donde se realizan pruebas unitarias con distintos motores y torques hasta buscar el más barato que cumpla con lo requerido.

	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]	TORQUE [kg*cm]	CUMPLE
Motorreductor 4632-370	12	2.3	25	SI
Motorreductor 80 RPM	12	3.2	18	SI
JGA25-370-130K	9	1.8	9.2	SI

Tabla 8. Pruebas torque distintos motorreductores. [Tabla propia]



motor model	No load			Rated			Stall			weight g	Large size mm
	Rated voltage	Rotating speed	Current	Rotating speed	Current	Torque	Torque	Current			
	V	$\pm 10\text{RPM}$	A	$\pm 10\text{RPM}$	A	KG. CM	KG. CM	A			
JGA25-370-130K	12	46	0.07	35	0.3	2.5	9.2	1.8	89	25	

Figura 35. Motorreductor JGA25-370-130K/ Especificaciones técnicas. [8]

Dada las especificaciones de torque con carga de 9.2 [Kg*cm] se realiza el análisis de torque para verificar que cumple con lo esperado.

$$\begin{aligned}
 To &= 10 \text{ [in * lb]} \\
 Fo &= \frac{10 \text{ [in * lb]}}{0.59 \text{ [in]}} = 16.94 \text{ [lb]} \\
 Fi &> Fo \\
 Ti &= 9.1 \text{ [Kg * cm]} = 6.9 \text{ [in * lb]} \\
 Fn &= \\
 Fi &= \frac{6.9 \text{ [in * lb]}}{0.59 \text{ [in]}} = 11.69 \text{ [lb]} \\
 11.69 \text{ [lb]} &< 16.94 \text{ [lb]}
 \end{aligned}$$

To: Torque mínimo [in * lb]

Fo: Fuerza mínima [lb]

*Ti: Torque motor [in * lb]*

Fi: Fuerza motor [lb]

Ec 1. Cálculos de torque y fuerza motorreductor.

El torque real necesario para la rosca es menor al teórico calculado, algo esperado dado que se usó un torque estándar para envases pet de distinta presentación y fabricantes, era un punto de partida que se validó experimentalmente.

Para lo referente al servomotor que se encarga de mover el mecanismo piñón/cremallera no fue difícil la elección dado que vienen tres tamaños estándar de servos, el micro, el normal y los oversize. Simplemente se revisó en el mercado el servo mas barato que tuviera un torque mínimo de 5.4 [Kg*cm], dado que el servo solo tiene 3 dimensiones, los micro no cumplen con el torque mínimo y los oversize están sobredimensionados.

Se llega a la conclusión de usar el servo motor MG995,



Product Model: MG995

Product Size: 40.7 * 19.7 * 42.9mm

Product weight: 55g

Operating torque: 15KG/cm

Reaction speed: 53-62R / M

Operating Temperature:-30 ~ +60 °

Deadband settings: 4 microseconds

Plug Type: JR, FUTABA General

Rotation angle: A maximum of 180 degrees

Operating current: 100mA

Using the voltage: 3-7.2V

Figura 36. Servomotor MG995 / Especificaciones técnicas. [8]

Con este servomotor seleccionado para el manejo del actuador lineal se cumple el torque mínimo necesario, adicional a esto se maneja un factor de seguridad de 2.7 .

9. DISEÑO ELECTRÓNICO DEL SISTEMA

Antes de elegir una fuente se debe definir los requerimientos de voltaje y corriente de todo el sistema:

CALCULOS FUENTE DE PODER			
ELEMENTO	ORIGEN PODER	VOLTAJE MAX [V]	CORRIENTE MAX [mA]
Arduino MAESTRO	PC	5	<32
Arduino ESCLAVO	PC	5	<32
Bomba de agua	Fuente	7	<2000
Puente H 1era etapa	Fuente	5	<36
Puente H 3ra etapa	Fuente	5	<36
Sensor de flujo	Fuente	5	<10
Sensor infrarrojo 1era etapa	Fuente	12	<100
Sensor infrarrojo motor trifasico F249	Fuente	5	<10
Motorreductor	Fuente	9	<1800
Servomotor	Fuente	5	<100
Modulo PWM 10V	Fuente	12	<100
TOTAL		12	4192 >

Tabla 9. Calculos fuente de poder. [Tabla propia]

Una vez realizada la suma de corrientes, se observa que se hace necesario el uso de una fuente que pueda entregar hasta 15V y 5A mínimo, suponiendo que todos los componentes trabajan al mismo tiempo con su máximo amperaje el consumo sería 4192 [mA].

Teniendo en cuenta lo anterior se elige una fuente biostar ATX la cual puede ofrecer 12V,5V y 3.3V, de igual manera entrega un máximo de 20A.



Figura 37. Fuente BIORSTAR ATX 500W. [8]

En algún punto del desarrollo se observa gran ruido en la sensorica del sistema imposibilitando la lectura correcta de estos, se realiza un análisis para buscar la razón de esto y se llega a la conclusión que el origen de esta es el motor trifásico y los motores DC, eso debido al embobinado a la falta de protecciones y etapas de filtrado en el sistema, como primera opción se toma la decisión de poner 3 capacitores de 10 [nF] 2A102J en paralelo entre el pin de Signal y GND, se observa una leve mejora pero no lo suficiente, como última opción se decide filtrar todo el sistema por medio de la fuente ATX usando un DC-DC booster.



Voltaje de entrada: DC 10 V-32 V.
Tensión de salida: 12V-35V DC (ajustable).
Corriente de salida: 10A (max).
Corriente de entrada: 16A (max) (más de 10A por favor fortalecer dissipador de calor o usar ventilador).
Potencia de salida: refrigeración natural 100 W (max), el fortalecimiento de enfriamiento 150 W (max) el poder real.
Eficacia de conversión: 94% (cuando la salida 19 V 2.5A Entrada 16 V, referencia).
Ondulación de la salida: 2% (max).
Temperatura de trabajo: industrial (-40 ° C a + 85 ° c) (temperatura del medio ambiente, más de 40 grados, por

Figura 38. DC-DC BOOSTER / Especificaciones técnicas. [8]

Se observa los pulsos de los sensores digitales ANTES de cualquier filtro con rizado.

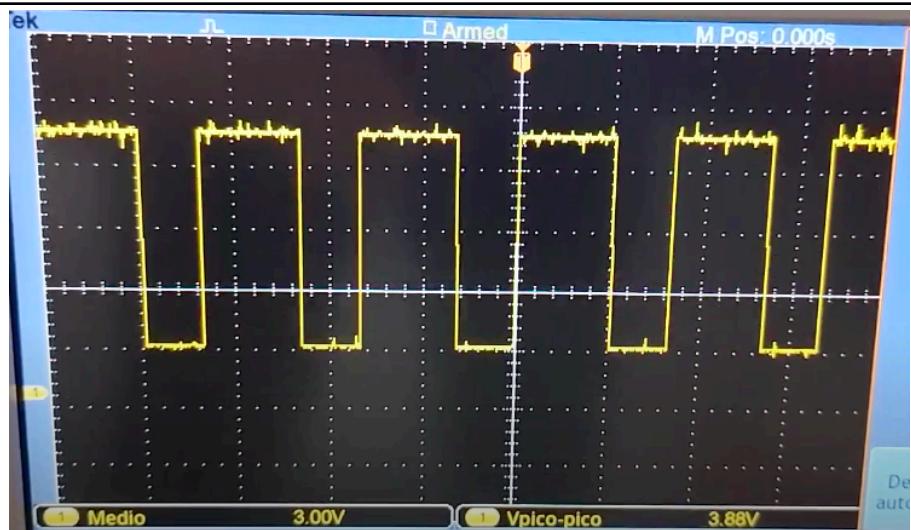


Figura 39. Pulsos digitales con ruido. [Imagen propia]

Después de aplicar el DC-DC BOOSTER y el arreglo de condensadores en paralelo:

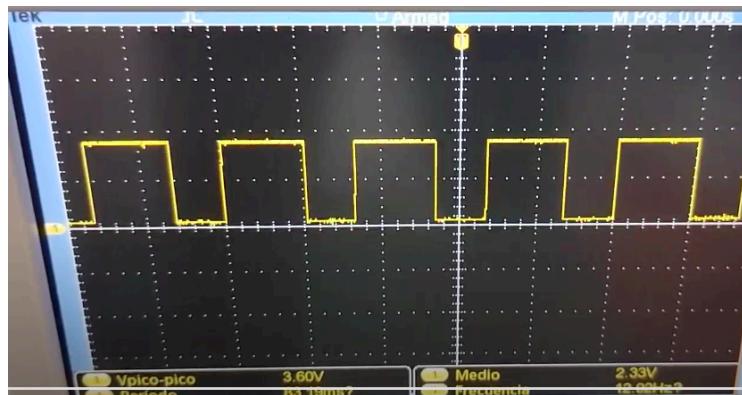


Figura 40. Pulsos digitales sin ruido. [Imagen propia]

Como resultado podemos ver cómo influyen las dos etapas de filtrado en el ruido aplicado al sensor F249 que lee los pulsos referentes a la velocidad de la banda transportadora:

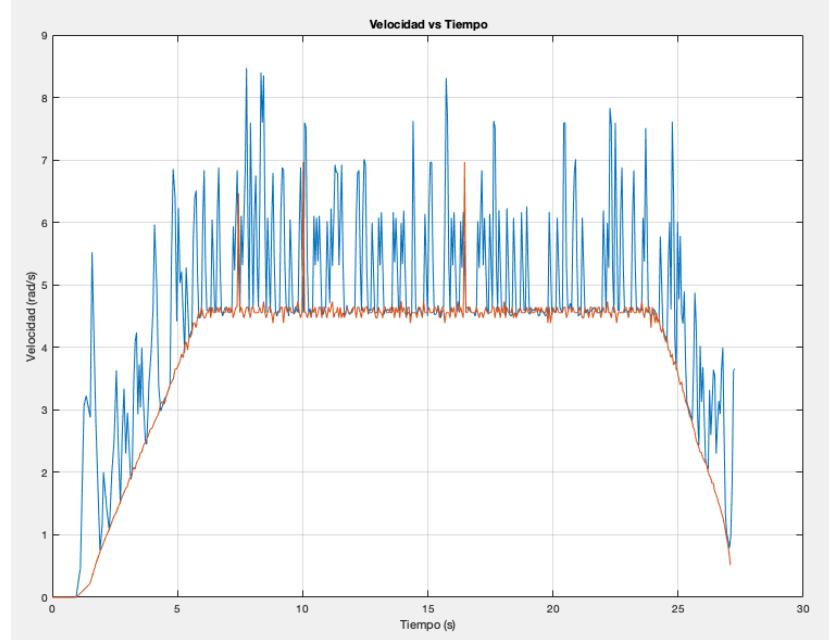


Figura 41. Señal sin filtro/con filtros. [Imagen propia]

Después de definir todo lo anterior el esquema eléctrico del sistema queda de la siguiente manera.

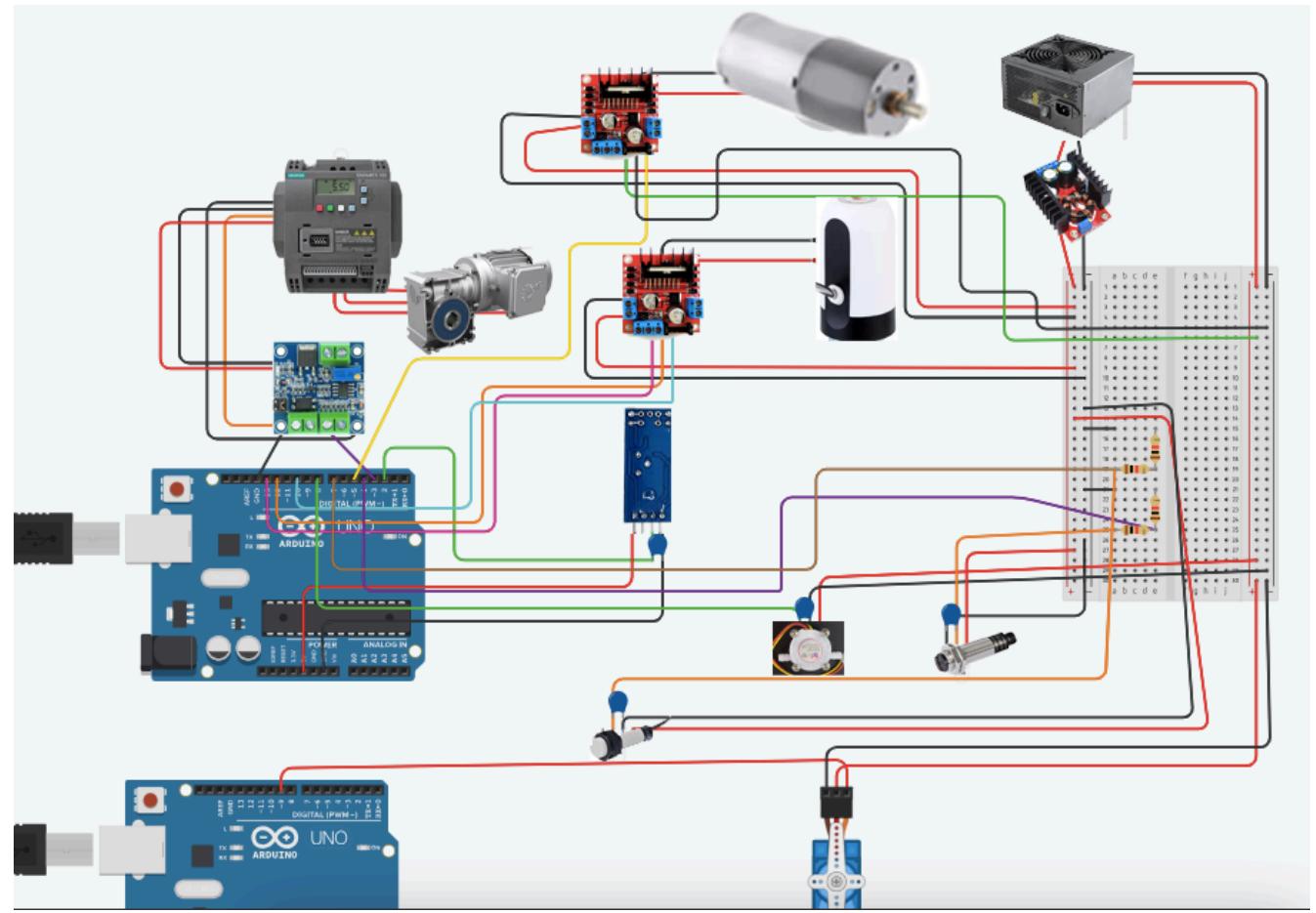


Figura 42. Esquema eléctrico general. [Imagen propia]

10. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

CONTROL SISTEMA LLENADO

Dado el sensor de flujo que genera una fuerza de oposición a la bomba de agua el caudal se redujo un 30%, debido a esto se decide implementar un controlador ON-OFF dado que se requiere la máxima potencia en todo momento para llenar la botella en el menor tiempo posible.

El modelo matemático del llenado de agua:

$$s * h = (PWM * Q) / (100 * A)$$

Ec 4. Ecuación dinámica llenado de tanque en frecuencia.

Para ello por medio del modelo matemático obtenemos la función de transferencia:

$$G_1 =$$

$$Q / (100 * A * s)$$

Ec 4. Función de transferencia h/PWM simbólica.

Por medio de los parámetros obtenemos la función de transferencia numérica:

Parámetros:

$$\begin{aligned} r &= 12.615 \text{ [mm]} \\ Q &= 30.466 \text{ [ml/s]} \\ A &= \pi * r^2 \text{ [mm}^2\text{]} \\ \text{Ec 5. Parámetros iniciales.} \end{aligned}$$

Función transferencia:

G =

30.47

4.999e04 s

Ec 6. Función de transferencia h/PWM numérica.

Se tiene el modelo matemático definido pero para efectos prácticos se implementa un controlador ON-OFF el cual no requiere los cálculos mostrados anteriormente.

CONTROL VELOCIDAD BANDA TRANSPORTADORA

Dada las ecuaciones dinámicas de un motor de Jaula de ardilla simple con eje de referencia d-q.

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + d\varphi_{qs}/dt + \omega\varphi_{ds}$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + d\varphi_{ds}/dt - \omega\varphi_{qs}$$

$$V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + d\varphi'_{qr}/dt + (\omega - \omega_r)\varphi'_{dr}$$

$$V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + d\varphi'_{dr}/dt - (\omega - \omega_r)\varphi'_{qr}$$

$$T_e = 1.5p(\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds})$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{2H} (T_e - b\omega_m - T_m)$$

Ec. 14. Ecuaciones Jaula de Ardilla Simple eje dq.

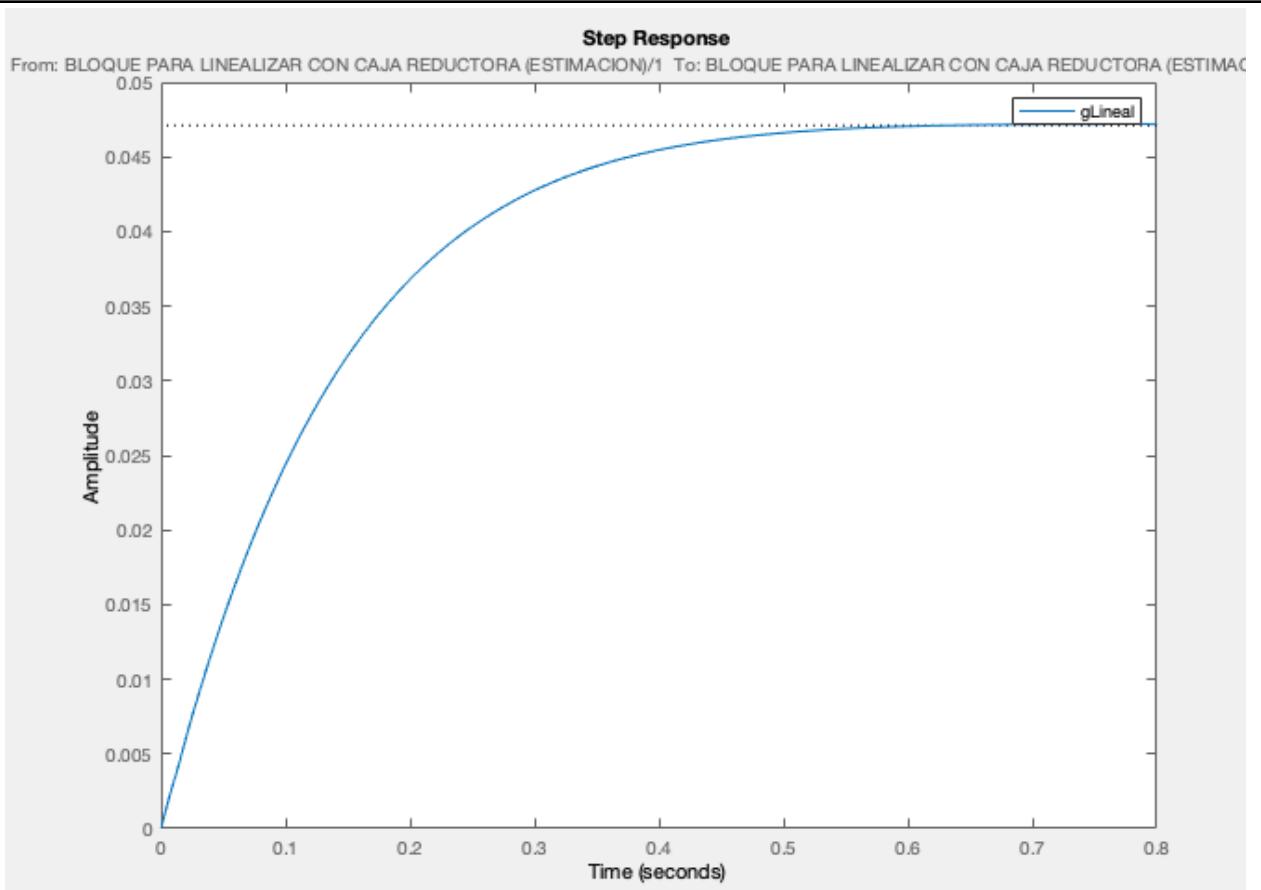


Figura 43. Respuesta transitoria velocidad sistema linealizado motor trifásico. [Imagen propia]

$G =$

$$\frac{1.279e-07 s^3 + 129300 s^2 + 1.881e07 s + 2.186e08}{s^5 + 520.6 s^4 + 458000 s^3 + 1.043e08 s^2 + 1.308e09 s + 4.64e09}$$

Continuous-time transfer function.

Ec. 15. Función de transferencia linealizada del sistema en continua.

Antes de abordar los diseños de los controladores, resulta necesario realizar la discretización de la función. Este paso se lleva a cabo con el objetivo de prevenir posibles inconvenientes relacionados con el periodo de muestreo en el futuro. En relación a lo mencionado, la función de transferencia G , una vez discretizada, queda de la siguiente manera:

$Gz =$

$$\frac{0.007361 z^4 - 0.004986 z^3 + 0.0003558 z^2 - 4.635e-06 z + 1.487e-08}{z^5 - 1.543 z^4 + 0.6066 z^3 - 0.00544 z^2 + 2.381e-05 z - 9.042e-10}$$

Sample time: 0.04 seconds

Ec. 16. Función de transferencia linealizada del sistema discreta.

Considerando que el objetivo es alcanzar un tiempo de establecimiento de 1 segundo y se planea realizar 20 muestras, se obtiene un periodo de muestreo de 50 ms, sin embargo, se decide optar por un periodo de 40 ms.

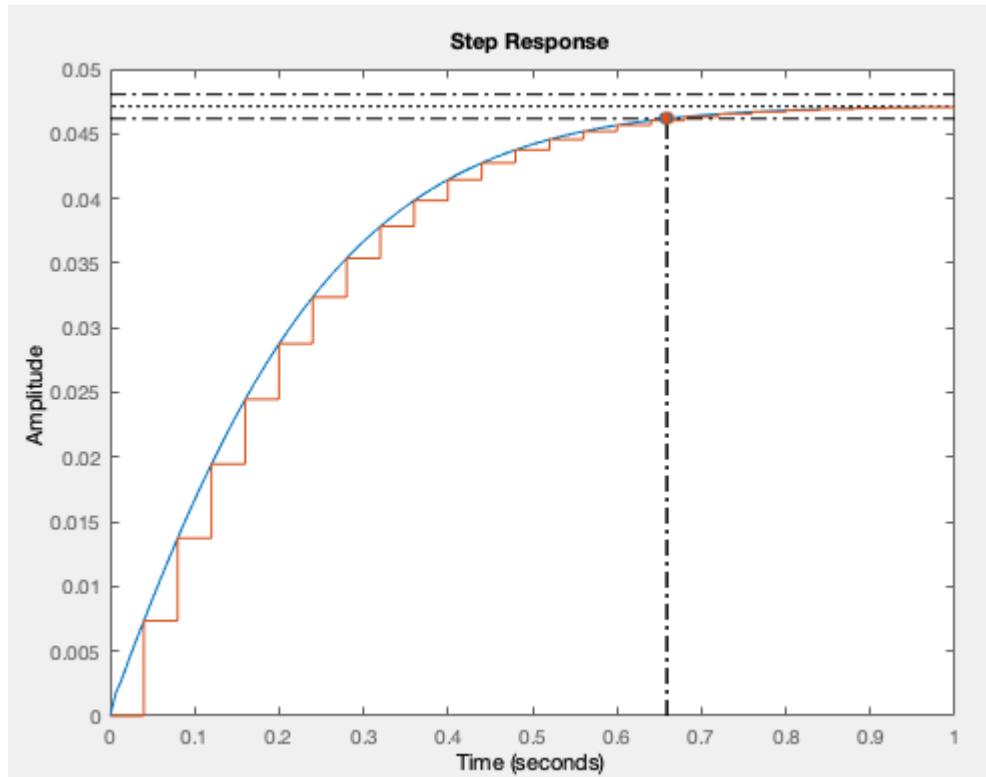


Figura 44. Respuesta transitoria velocidad continua y discreta. [Imagen propia]

$$\begin{aligned} C_{pid} = \\ \frac{9.89 z^2 - 8.485 z + 0.9276}{z^2 - z} \end{aligned}$$

Sample time: 0.04 seconds

Ec. 17. Función de transferencia controlador PID ideal 1 DOF.

Se ha logrado diseñar un controlador PID óptimo que alcanzará el punto de referencia establecido y cumplirá con los criterios de diseño establecidos.

Una vez completado el diseño, se tomó la decisión de llevar a cabo simulaciones en lazo cerrado con distintos puntos de referencia.

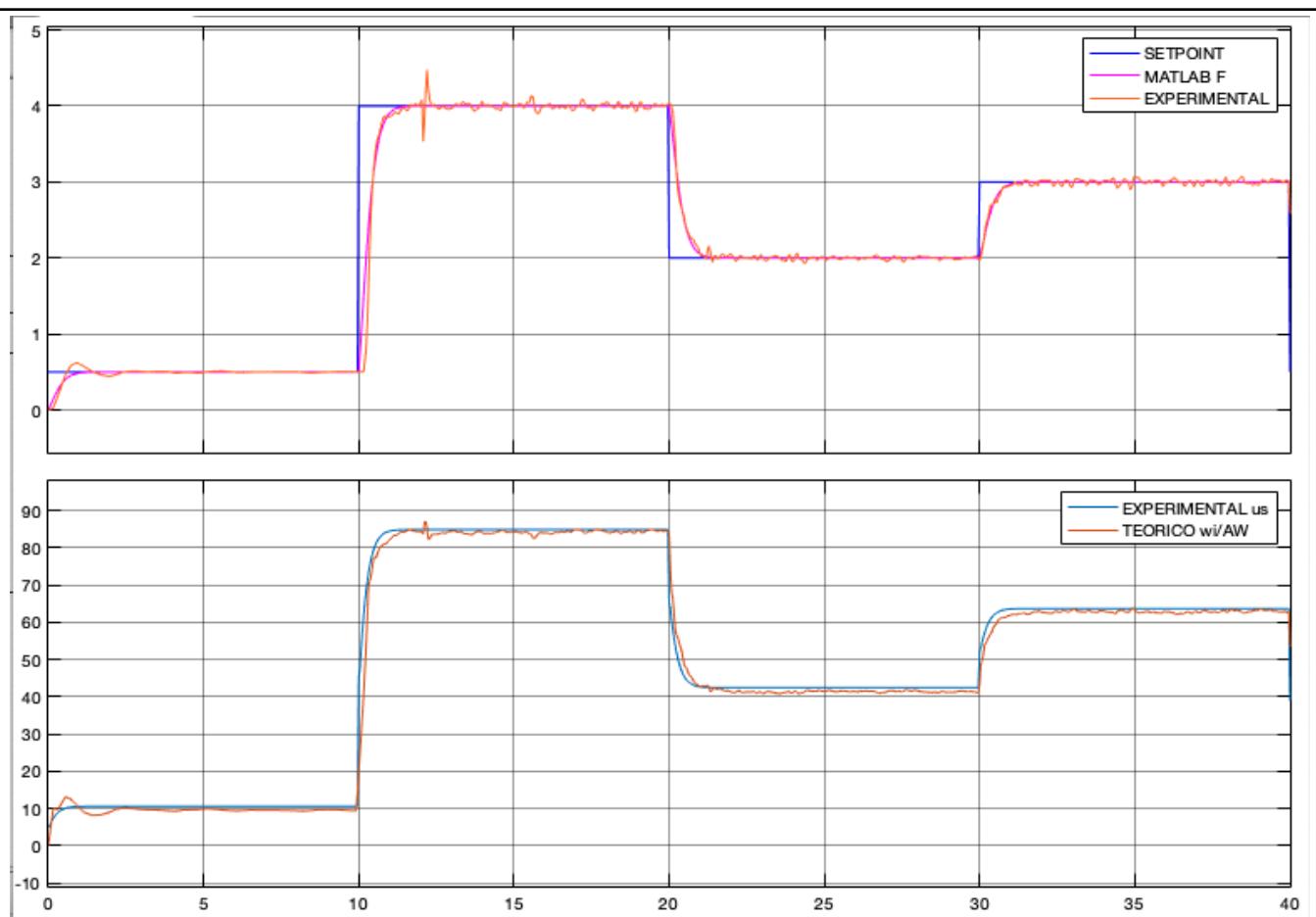


Figura 45. Respuesta transitoria velocidad motor con PWM simulado en SIMULINK con PID. [Imagen propia]

Eje X: Tiempo (segundos)

Eje Y1: Velocidad (rads/s)

Eje Y2: PWM (%)

DISEÑO DEL PROGRAMA DE CONTROL

Se diseña el controlador para implementar en Matlab function y su posterior versión final en el programa principal Javascript.

CONTROLADOR LLENADO MATLAB FUNCTION	CONTROLADOR LLENADO JAVASCRIPT
<pre>function [us] = fcn(Sp, Pv) if Sp >= Pv us = 100; else us = 0; us = umax;</pre>	<pre>function fillBottle() { if (startTime2) { startTime3 = true; TIME2 = Date.now();</pre>

```
end
end
```

```
startTime2 = false;
}

if (Date.now() - TIME2 >= 2000 &&
flagStopCon && !flagStopConvEn) {
    waterPWM = 200; // ENCENDER BOMBA
}

localML = (flow / waveperL) * 1000;
flowRateInstant = (localML / (Date.now() - TIME2)) * 1000;

if (localML > volFill) {
    waterPWM = 0;
    if (startTime3) {
        TIME3 = Date.now();
        startTime3 = false;
    }

    if (Date.now() - TIME3 >= 2000 &&
flagStopCon) {
        flagStopCon = false;
        totalML = totalML + (localML - 37);
        countBottle++;
    }
}
}
```

Tabla 10. Controladores de llenado simulados/implementados. [Tabla propia]

CONTROLADOR VEL. BANDA MATLAB FUNCTION	CONTROLADOR VEL BANDA JAVASCRIPT
<pre>function [us, Con_out] = fcn(Sp, Pv, Con_ini) en_1 = Con_ini(1); l_error_1 = Con_ini(2); difact = Con_ini(3); umin = 0; umax = 100; % 1 SEGUNDOS Kp = 4.129839917619998; Ki = 2.333050066190001; Kd = 0.927610016190000; N = 0;</pre>	<pre>let Kp = 4.129839917619998; let Ki = 2.333050066190001; let Kd = 0.927610016190000; let Ka = 0.9; let N = 0; en = sp - velFiltered; A_p = Kp * en; A_d = Kd * (en - en_1) + N * Ad_1;</pre>

```

kaw = 0.1;

en = Sp - Pv;
Ap = Kp*en;
Ad = Kd*(en-en_1);
I_error = en + I_error_1 + kaw*difact;
Ai = Ki*I_error;
un = Ap + Ai + Ad;
us = un;

if un < umin
    us = umin;
end
if un > umax
    us = umax;
end

en_1 = en;
I_error_1 = I_error;
difact = us - un;

Con_out = [en_1; I_error_1; difact];

I_error = en + I_error_1 + Ka * dif_act;
A_i = Ki * I_error;
Uc = A_p + A_d + A_i;
un = Uc;

if (Uc < 0) {
    un = 0;
}
if (Uc > 100) {
    un = 100;
}
convePWM = (un / 100) * 255;
board.analogWrite(enableCon, convePWM);

en_1 = en;
I_error_1 = I_error;
dif_act = un - Uc;
Ad_1 = A_d;

```

Tabla 11. Controladores simulados/implementados. [Tabla propia]

RESULTADOS

Primero se verifica que el controlador ON-OFF de la bomba de agua esté funcionando correctamente, esto quiere decir que entregue el mismo caudal y la misma cantidad de ml en todas las pruebas.

Se verifica que el caudal sea aproximadamente el mismo para todas las pruebas.

CAUDAL BOMBA		
ML	Tiempo	Caudal ml/s
401.11	21.499	18.65714684
400.15	22.54	17.75288376
401.3	20.594	19.48625813
400.154	22.86	17.50454943
397.26	21.004	18.91354028
PROM:		18.46287569

Tabla 11. Pruebas caudal bomba. [Tabla propia]

Ahora bien, se verifica que el volumen de agua fue aproximadamente el mismo en todas las pruebas:

LLENADO BOTELLA		
ML REAL	ML SENSOR	ERROR ML
404.1	404.4	-0.3
406.4	404.5	1.9
400.3	399.57	0.73
397.7	400.34	-2.64
		0.0775

Tabla 12. Volumen entregado. [Tabla propia]

Teniendo estos resultados ahora se debe analizar etapa por etapa el porcentaje de fallos que presenta, para lo referente a la primera etapa se analizan dos aspectos, si el envase PET quedó alineado con la boquilla de salida de agua.

FALLOS PRIMERA ETAPA		
	PRUEBAS	PORCENTAJE
ALINEA	9	90
NO ALINEA	1	10
TOTAL	10	100

Tabla 13. Fallos primera etapa [Tabla propia]

Para lo referente a la segunda etapa se analizan dos aspectos, si pone la tapa correctamente o no.

FALLOS SEGUNDA ETAPA		
	PRUEBAS	PORCENTAJE
PUSO TAPA	19	95
NO PUSO TAPA	1	5
TOTAL	20	100

Tabla 14. Fallos segunda etapa. [Tabla propia]

Por último, para la tercera etapa se analizan 3 aspectos, que enrosque correctamente, que lo haga a medias o que falle la alineación entre el envase y el mecanismo.

FALLOS TERCERA ETAPA		
	PRUEBAS	PORCENTAJE
BIEN ROSCA	12	60
MEDIO ROSCA	6	30
NO ALINEA	2	10
TOTAL	20	100

Tabla 14. Fallos tercera etapa. [Tabla propia]

Una vez realizadas las pruebas unitarias se hace con todo el sistema en conjunto en el cual se analiza cuántas veces pasa correctamente por cada etapa.

PUEBAS GENERALES SISTEMA				
	1ERA ETAPA	2DA ETAPA	3RA ETAPA	PRUEBAS
EXITO	10	10	9	10
PORCENTAJE	100	100	90	

Tabla 15. Fallos del sistema en general. [Tabla propia]

Referencias bibliográficas

- [1] JEFFER SNEIDER, A. L. (2020). SISTEMA CIBERFÍSICO PARA LA SIMULACIÓN DE MÚLTIPLES BOMBAS CENTRÍFUGAS EN CONFIGURACIÓN VARIABLE MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE INDUSTRIA 4.0 [Proyecto de grado inédita]. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA.
- [2] SÁNCHEZ A, S., & GIRALDO, E. (2008). MODELADO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN EN EL SISTEMA DE COORDENADAS DE CAMPO ORIENTADO DEL FLUJO DE ROTOR. (No 39), pp 89–93.
- [3] GONZÁLEZ ACEVEDO, H. (2008). *MODELO, SIMULACIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICO*. Universidad Industrial de Santander.
- [4] *Model dynamics of three-phase asynchronous machine, also known as induction machine,in SI or pu units - Simulink- MathWorks América Latina*. (s.f.). MathWorks - Creadores de MATLAB y Simulink - MATLAB y Simulink - MATLAB & Simulink.
<https://la.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/asynchronousmachine.html>
- [5] Gómez Sánchez, J. C. (2016). *Caracterización, obtención y validación del modelo dinámico de un motor de inducción para tracción eléctrica, según la IEC 60034* [TRABAJO FIN DE GRADO inédito]. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA.
- [8] Johnson, C. D. (2016). *Process Control Instrumentation Technology* (9th ed.). Boston, MA: Pearson.

[9] Doebelin, E. O., & Manik, D. N. (2017). Measurement Systems: Application and Design (6th ed.). New York, NY: McGraw-Hill Education.