

**Diseño de un sistema automatizado para el llenado y tapado de botellas en una fábrica de  
cerveza artesanal**

**Gerson Hernández Olave, Danilo Galeano Lizarazo**

**Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Mecatrónico**

**Director**

**Kelly Niño Sandoval**

**Especialista en Automatización Industrial**

**Codirector**

**Pedro Pablo Díaz Jaimes**

**Magíster en Dirección y Gestión de Proyectos**

**Universidad Santo Tomás, Bucaramanga**

**División de Ingenierías y Arquitectura**

**Facultad de Ingeniería Mecatrónica**

**2024**

### **Dedicatoria**

Dedicamos este trabajo con profundo aprecio a los destacados profesores que han dejado una huella indeleble en nuestro desarrollo intelectual durante nuestra travesía por la fascinante carrera de ingeniería mecatrónica. Especialmente, queremos expresar nuestro reconocimiento a la profesora Kelly J. Niño, cuya presencia fue un pilar fundamental en la culminación exitosa de nuestros estudios. Su paciencia inagotable y determinación incansable han moldeado el carácter de innumerables estudiantes de ingeniería mecatrónica en la Universidad Santo Tomás.

Asimismo, extendemos nuestro sincero agradecimiento al profesor Pedro P. Díaz, cuya vasta experiencia en ingeniería mecánica nos ha guiado hacia la excelencia. Su enfoque meticuloso y su énfasis en la ética y los principios han sido una inspiración constante en nuestro camino hacia el aprendizaje y el crecimiento profesional.

A ambos maestros, les expresamos nuestra más profunda gratitud por su dedicación, su sabiduría y su compromiso con la formación de futuros ingenieros. Su influencia perdurará en cada paso que demos en nuestra carrera y en nuestra vida.

### **Agradecimiento**

Agradecemos profundamente a Dios y a todos nuestros queridos familiares y amigos que, con su incondicional apoyo, nos han acompañado en cada etapa de nuestro crecimiento personal y académico. Gracias a su constante aliento y buenas intenciones, hemos alcanzado con éxito el culmen de nuestra formación en ingeniería mecatrónica, sin ningún remordimiento del pasado, solo mirando hacia adelante con optimismo y determinación.

Nos sentimos bendecidos por haber contado con su respaldo inquebrantable, el cual nos ha impulsado a enfrentar cada desafío con valentía y perseverancia. Ahora, con el horizonte despejado, anhelamos contribuir activamente a nuestra comunidad y ser un faro de luz en cada camino que emprendamos.

Una vez más, extendemos nuestro más sincero agradecimiento a todos aquellos que han sido parte fundamental de este camino, y confiamos en que juntos seguiremos construyendo un futuro lleno de éxitos y oportunidades para todos.

## Contenido

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introducción .....                                                                                                  | 13 |
| 1. Diseño de un sistema automatizado para el llenado y tapado de botellas en una fábrica de cerveza artesanal ..... | 15 |
| 1.1 Motivación y formulación del problema .....                                                                     | 15 |
| 1.2 Finalidad.....                                                                                                  | 17 |
| 1.2.1 Objetivo general .....                                                                                        | 17 |
| 1.2.2 Objetivos específicos.....                                                                                    | 17 |
| 1.3 Aportes del trabajo .....                                                                                       | 18 |
| 2. Marco de referencia .....                                                                                        | 19 |
| 2.1 Marco teórico .....                                                                                             | 20 |
| 2.1.0 Proceso de llenado y tapado .....                                                                             | 20 |
| 2.1.1 El controlador lógico programable (PLC, por sus siglas en inglés) .....                                       | 23 |
| 2.1.2 Actuadores.....                                                                                               | 27 |
| 2.1.3 Electroválvulas .....                                                                                         | 28 |
| 2.1.4 Sensores .....                                                                                                | 29 |
| 2.1.5 Neumática.....                                                                                                | 31 |
| 2.1.6 Tanques de almacenamiento.....                                                                                | 32 |
| 2.1.7 Mecánica de fluidos.....                                                                                      | 34 |
| 2.1.8 Resistencia materiales.....                                                                                   | 37 |
| 2.1.9 Normativas según la ISA(International Society Automation).....                                                | 39 |
| 2.2 Marco legal.....                                                                                                | 42 |
| 2.4 Marco tecnológico y científico (estado del arte).....                                                           | 44 |

|                                                       |     |
|-------------------------------------------------------|-----|
| 2.5 Condiciones iniciales del proyecto.....           | 47  |
| 3. Diseño metodológico .....                          | 49  |
| 3.1 Investigación .....                               | 49  |
| 3.2 Diseño del sistema.....                           | 50  |
| 3.3 Simulación.....                                   | 50  |
| 3.4 Pruebas .....                                     | 50  |
| 3.5 Análisis de datos.....                            | 50  |
| 3.6 Interpretación y presentación de resultados ..... | 51  |
| 3.7 Criterios de diseño.....                          | 51  |
| 3.8 Descripción de etapas y tareas.....               | 74  |
| 3.9 Conclusión del capítulo .....                     | 76  |
| 4. Desarrollo.....                                    | 76  |
| 4.1 Diseño.....                                       | 76  |
| 4.2 Simulaciones matemáticas .....                    | 80  |
| 4.3 Resultados .....                                  | 95  |
| 4.4 Discusión de resultados .....                     | 96  |
| 5. Conclusiones. ....                                 | 97  |
| 6. Trabajos futuros .....                             | 99  |
| Referencias.....                                      | 100 |

**Lista de tablas**

|                                                                                  |           |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tabla 1.</b> <i>Comparativa de alternativas PLC .....</i>                     | <i>61</i> |
| <b>Tabla 2.</b> <i>Tabla de pesos aproximado del rack de cerveza y CO2 .....</i> | <i>94</i> |
| <b>Tabla 3.</b> <i>Tabla de peso aproximado del rack de liberación.....</i>      | <i>95</i> |

**Lista de figuras**

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> <i>Máquina de llenado y tapado Cozzoli</i> .....                 | 22 |
| <b>Figura 2.</b> <i>PLC con HMI</i> .....                                         | 27 |
| <b>Figura 3</b> <i>Actuadores</i> .....                                           | 28 |
| <b>Figura 4</b> <i>Sensores</i> .....                                             | 30 |
| <b>Figura 5</b> <i>Neumática industrial</i> .....                                 | 32 |
| <b>Figura 6</b> <i>Tanques de almacenamiento para bebidas carbonatadas.</i> ..... | 34 |
| <b>Figura 7</b> <i>Ecuación de continuidad</i> .....                              | 35 |
| <b>Figura 8</b> <i>Ecuación de Bernoulli</i> .....                                | 36 |
| <b>Figura 9</b> <i>Ecuación de empotramiento perfecto.</i> .....                  | 39 |
| <b>Figura 10</b> <i>HMI según la normativa ISA101</i> .....                       | 42 |
| <b>Figura 11.</b> <i>Máquina actual para el proceso de llenado y tapado</i> ..... | 49 |
| <b>Figura 12.</b> <i>Fuente de alimentación</i> .....                             | 53 |
| <b>Figura 13.</b> <i>PLC</i> .....                                                | 54 |
| <b>Figura 14.</b> <i>HMI</i> .....                                                | 54 |
| <b>Figura 15.</b> <i>Sensor Reflex</i> .....                                      | 54 |
| <b>Figura 16.</b> <i>Final de carrera</i> .....                                   | 55 |
| <b>Figura 17.</b> <i>Breaker</i> .....                                            | 55 |
| <b>Figura 18.</b> <i>Electroválvula</i> .....                                     | 55 |
| <b>Figura 19.</b> <i>Cilindro doble efecto</i> .....                              | 56 |
| <b>Figura 20.</b> <i>Electroválvula neumática</i> .....                           | 56 |
| <b>Figura 21.</b> <i>Pulsador parada de emergencia</i> .....                      | 56 |
| <b>Figura 22.</b> <i>Modulo de salidas digitales</i> .....                        | 57 |

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 23</b> <i>Válvula estranguladora</i> .....                           | 57 |
| <b>Figura 24.</b> <i>Botellas presionadas por el cilindro</i> .....            | 58 |
| <b>Figura 25.</b> <i>Esquema proceso de llenado</i> .....                      | 59 |
| <b>Figura 26.</b> <i>Gemma</i> .....                                           | 63 |
| <b>Figura 27.</b> <i>Graficet de todo el proceso de llenado y tapado</i> ..... | 64 |
| <b>Figura 28.</b> <i>. Macro etapa 1- etapa de llenado</i> .....               | 65 |
| <b>Figura 29.</b> <i>Macro etapa 2- etapa de tapado</i> .....                  | 66 |
| <b>Figura 30</b> <i>Programación TIA Portal v18.</i> .....                     | 67 |
| <b>Figura 31.</b> <i>Interfaz HMI</i> .....                                    | 68 |
| <b>Figura 32.</b> <i>HMI-vista Válvulas</i> .....                              | 69 |
| <b>Figura 33.</b> <i>HMI-vista Proceso general</i> .....                       | 69 |
| <b>Figura 34.</b> <i>Simulación de conexión electroneumática</i> .....         | 70 |
| <b>Figura 35.</b> <i>Simulación del PLC</i> .....                              | 71 |
| <b>Figura 36.</b> <i>Esquema de conexión del PLC Y FluidSIM</i> .....          | 73 |
| <b>Figura 37.</b> <i>Armazón individual</i> .....                              | 77 |
| <b>Figura 38.</b> <i>Canastas recolectoras de residuos</i> .....               | 78 |
| <b>Figura 39.</b> <i>Tablero eléctrico y de control</i> .....                  | 79 |
| <b>Figura 40.</b> <i>Primer prototipo</i> .....                                | 80 |
| <b>Figura 41.</b> <i>Momento de inercia tubo 40X40X1,5</i> .....               | 82 |
| <b>Figura 42.</b> <i>Armazón parte superior</i> .....                          | 83 |
| <b>Figura 43.</b> <i>Armazón Parte inferior</i> .....                          | 85 |
| <b>Figura 44.</b> <i>BGS08 High Load Ball Guide</i> .....                      | 87 |
| <b>Figura 45.</b> <i>Cilindros neumáticos y bases</i> .....                    | 89 |

|                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Figura 46.</b> <i>Momento de inercia de la base llenadora .....</i> | <b>90</b> |
| <b>Figura 47.</b> <i>Base soporte de botellas .....</i>                | <b>93</b> |
| <b>Figura 48.</b> <i>Sistemas de racks de la parte superior .....</i>  | <b>94</b> |
| <b>Figura 49.</b> <i>Prototipo final.....</i>                          | <b>96</b> |

**Lista apéndices**

**Apéndice A.** *Avance\_hmi*

**Apéndice B.** *Planos\_Electricos\_Neumatico*

**Apéndice C.** *Plano\_Armazon\_Completo*

**Apéndice D.** *Plano\_Base\_Botellas*

**Apéndice E.** *Plano\_Base\_Llenado*

**Apéndice F.** *Plano\_Base\_Tapado*

**Apéndice G.** *Plano\_Canasta\_Residuos*

**Apéndice H.** *Plano\_Pictorico*

**Apéndice I.** *Plano\_Rack\_Liberacion*

**Apéndice J.** *Plano\_Rack\_Llenado*

**Apéndice K.** *PLCTags\_2024*

*Nota:* (ver archivos externos)

### Resumen

Este proyecto aborda el desafío en una fábrica de cerveza artesanal relacionado con el llenado y tapado manual de botellas, buscando mejorar la calidad del proceso de envasado. El propósito es diseñar un sistema automatizado que facilite estas tareas, aumentando la productividad y reduciendo errores.

La principal contribución radica en la implementación de un diseño integral que abarca desde la entrada de botellas vacías hasta la salida de botellas llenas y tapadas. Los criterios de diseño se enfocan en la fiabilidad, velocidad del sistema. La metodología propuesta implica un enfoque paso a paso para abordar el diseño y simulación del sistema automatizado de llenado y tapado de botellas en una fábrica de cerveza artesanal.

En los resultados de simulación se observa la implementación de un sistema integral una mejora significativa en la eficiencia operativa, reduciendo tiempos de ciclo y disminuyendo errores asociados al llenado y tapado manual. El sistema automatizado ofrece aplicaciones potenciales en diversas industrias de bebidas embotelladas, proporcionando una solución eficaz y versátil para optimizar procesos similares.

En conclusión, este proyecto presenta una solución utilizando la Ingeniería Mecatrónica al abordar con éxito la problemática específica de envasado en la industria cervecera artesanal. La implementación del sistema automatizado no solo mejora la precisión, sino que también reduce costos operativos y minimiza el riesgo de contaminación. Estos resultados destacan la viabilidad y relevancia de la automatización en la mejora de procesos industriales, especialmente en el sector de la cerveza artesanal.

*Palabras clave:* cerveza artesanal, automatización industrial, proceso de envasado, diseño mecatrónico, procesos de manufactura

### **Abstract**

This project addresses the challenge in a craft brewery related to the manual filling and capping of bottles, seeking to improve the quality of the packaging process. The purpose is to design an automated system that facilitates these tasks, increasing productivity and reducing errors.

The main contribution lies in the implementation of an integral design that covers from the entry of empty bottles to the exit of filled and capped bottles. The design criteria focus on reliability and system speed. The proposed methodology involves a step-by-step approach to address the design and simulation of the automated bottle filling and capping system in a craft brewery.

Simulation results show that the implementation of an integrated system significantly improves operational efficiency, reducing cycle times and reducing errors associated with manual filling and capping. The automated system offers potential applications in various bottled beverage industries, providing an efficient and versatile solution to optimize similar processes.

In conclusion, this project presents a solution using Mechatronic Engineering by successfully addressing the specific packaging problem in the craft brewing industry. The implementation of the automated system not only improves accuracy, but also reduces operating costs and minimizes the risk of contamination. These results highlight the feasibility and relevance of automation in improving industrial processes, especially in the craft beer sector.

*Keywords:* craft beer, industrial automation, packaging process, mechatronics design, manufacturing processes, mechatronic design

## **Introducción**

La Ingeniería Mecatrónica se encuentra en constante evolución y desafío, abordando problemáticas diversas y apasionantes en la industria. En este contexto, el presente proyecto de grado se enfoca en el diseño de un sistema automatizado para el llenado y tapado de botellas en una fábrica de cerveza artesanal. Este proyecto aborda una problemática relevante en la producción de cerveza artesanal, buscando mejorar la eficiencia y la calidad del proceso de envasado.

El propósito de esta introducción es presentar de manera concisa y convincente la relevancia y el interés de este proyecto. A continuación, se resumen los aspectos clave a abordar:

¿Cuál es el problema?: el problema a resolver es la necesidad de automatizar el proceso de llenado y tapado de botellas en una fábrica de cerveza artesanal, que actualmente se realiza de manera manual, lo que implica limitaciones en términos de eficiencia y precisión.

¿Cuál es la estrategia para resolver el problema (metodología)?: la estrategia consiste en diseñar un sistema automatizado que realice el llenado y tapado de botellas de manera eficiente, incorporando tecnología mecatrónica y control automático.

¿Por qué es interesante e importante?: este proyecto es interesante porque aborda un desafío técnico en un campo en crecimiento, la cerveza artesanal, y es importante debido a su potencial impacto en la mejora de la producción y la competitividad de las fábricas de cerveza artesanal.

¿Por qué no ha sido resuelto antes?: aunque existen sistemas automatizados para el envasado en la industria cervecera, estos suelen ser costosos y poco accesibles para las pequeñas fábricas artesanales. Este proyecto se enfoca en desarrollar una solución adaptada a las necesidades específicas de este sector.

Finalidad y objetivos del trabajo: la finalidad de este trabajo es diseñar un sistema automatizado eficiente y preciso para el llenado y tapado de botellas en fábricas de cerveza artesanal. Los objetivos específicos se detallarán en la sección correspondiente.

Impacto del proyecto en el campo de estudio: este proyecto contribuirá al avance de la Ingeniería Mecatrónica al aplicar sus principios y tecnologías a un contexto industrial específico, mejorando la productividad y calidad en la producción de cerveza artesanal.

Beneficios prácticos: los beneficios prácticos incluyen la reducción de tiempo y costos, la mejora de la calidad del producto, la optimización del proceso de producción y la posibilidad de crecimiento de las pequeñas fábricas de cerveza artesanal.

## **1. Diseño de un sistema automatizado para el llenado y tapado de botellas en una fábrica de cerveza artesanal**

### **1.1 Motivación y formulación del problema**

El proyecto "Diseño de un sistema automatizado para el llenado y tapado de botellas en una fábrica de cerveza artesanal" se enfoca en resolver la problemática de la producción manual de cerveza artesanal. Actualmente, el proceso de llenado y tapado de botellas se realiza de manera manual, lo que conlleva ineficiencias en términos de tiempo y precisión. Esta situación limita la capacidad de producción y la calidad del producto final.

Algunos de los principales factores que impulsan el crecimiento del mercado de bebidas alcohólicas son:

*El aumento de la población y los ingresos:* con el aumento de la población y los ingresos, se espera que aumente la demanda de bebidas alcohólicas en todo el mundo.

*La creciente popularidad de los cócteles:* la creciente popularidad de los cócteles y las bebidas mixtas ha aumentado la demanda de licores y destilados.

*El creciente interés en la cultura del vino:* el creciente interés en la cultura del vino ha aumentado la demanda de vinos de alta calidad, incluyendo vinos orgánicos y naturales.

*La creciente demanda de cervezas artesanales:* la creciente popularidad de las cervezas artesanales ha aumentado la demanda de cervezas de alta calidad y ha generado oportunidades para los productores de cerveza artesanal.

Sin embargo, haciendo énfasis en el mercado de cerveza artesanal, el productor se ve en la necesidad de cumplir algunos desafíos a la hora de realizar un producto final de buena calidad y estar a la altura en la creciente competencia entre los productores de bebidas alcohólicas. En

general, se espera que el mercado de bebidas alcohólicas continúe creciendo en los próximos años debido a la demanda mundial en constante evolución.

La fábrica de cerveza artesanal para la cual se piensa diseñar el proyecto consta de algunos problemas para mantener un buen nivel de calidad y producción, ya que específicamente el proceso de llenado y tapado de botellas se realiza de manera manual y como consecuencia trae malos resultados en lo que ha ganancias y pérdidas respecta.

Teniendo en cuenta este problema específico, lo que se busca con este proyecto es aumentar la producción de manera que se mantenga la calidad y la higiene correcta del producto. El proyecto ofrecería varias ventajas en comparación con el sistema de envasado manual que tiene la fábrica, entre las cuales se incluyen:

*Mayor velocidad:* el sistema automatizado debe ser capaz de llenar y sellar productos a una velocidad mucho más rápida que el sistema manual. Esto permite una mayor capacidad de producción y, por lo tanto, un aumento en la eficiencia y la rentabilidad.

*Mayor precisión:* el sistema estará diseñado para proporcionar una dosificación precisa a la hora del llenado del producto. Esto asegura que cada botella contenga la misma cantidad de producto, lo que reduce el desperdicio y mejora la calidad del producto final.

*Menos errores:* con el proyecto que se propone, la posibilidad de errores humanos se reduce significativamente. Esto se traduce en una mayor precisión en el llenado y sellado, y una disminución en el número de productos defectuosos.

*Ahorro de tiempo y costos:* al automatizar el proceso de llenado y tapado de botellas, se reduce la necesidad de mano de obra y se elimina la necesidad de dedicar tiempo a la capacitación de los trabajadores. Esto puede conducir a una reducción en los costos laborales y ahorro de tiempo en el proceso de producción.

*Flexibilidad:* el proyecto se plantea para ser capaz de manejar diferentes tipos de cerveza y tamaño de botellas. Esto permite al productor cambiar rápidamente la línea de producción y adaptarse a las demandas del mercado.

*Mayor seguridad:* el proyecto se diseñará con las normas de seguridad y salud ocupacional, lo que reduce el riesgo de lesiones y accidentes en el lugar de trabajo.

En resumen, el proyecto propuesto puede mejorar significativamente la eficiencia y rentabilidad del productor, al mismo tiempo que garantiza la calidad y precisión del producto final.

## **1.2 Finalidad**

### **1.2.1 *Objetivo general***

Diseñar un sistema automatizado que permita el llenado y tapado eficiente de botellas de cerveza artesanal garantizando la precisión en el llenado, la hermeticidad del tapado y la productividad en el proceso, con el fin de mejorar la eficiencia y calidad de la producción de cerveza artesanal.

### **1.2.2 *Objetivos específicos***

Investigar y analizar la literatura científica y técnica disponible para identificar las mejores prácticas en el llenado y tapado de botellas de cerveza artesanal, evaluando las características, capacidades y rendimiento de los diferentes equipos y tecnologías.

Diseñar el sistema mecánico, hidráulico y eléctrico, que incluya la disposición de los equipos, el flujo de botellas, los sistemas de transporte y los mecanismos de llenado y tapado, considerando los requerimientos de presión basados en la investigación, caudal y componentes de

control como PLC (Controlador Lógico Programable) y HMI (Interfaz de Usuario) para el llenado y tapado de botellas de cerveza artesanal.

Realizar el programa de control para el PLC, que incluya las secuencias de operación, el control de los actuadores y sensores, así como los algoritmos de control para el llenado y la hermeticidad del tapado.

Realizar simulaciones del sistema automatizado utilizando software de simulación adecuado, para validar el programa de control, el diseño mecánico, el sistema hidráulico, el sistema eléctrico, y evaluar diferentes escenarios de producción, con el fin de asegurar un correcto funcionamiento del sistema y prever posibles problemas.

### 1.3 Aportes del trabajo

La solución consiste en la implementación de un sistema de embotellado y tapado completamente automatizado y eficiente. Este sistema permite la transferencia de la producción de cerveza artesanal desde un proceso manual y rudimentario a uno automatizado y controlado por máquinas. La solución incluye:

*Embotelladora automatizada:* una máquina embotelladora de alta precisión que llenará las botellas de cerveza de manera uniforme y sin derrames.

*Tapadora automatizada:* se diseñó una tapadora automática que garantiza un sellado hermético y seguro de las botellas, ajustando automáticamente la presión y el proceso de tapado.

*Control de procesos:* se diseñó un sistema de control que supervisa y regula todas las etapas del proceso de embotellado y tapado, asegurando una alta calidad constante del producto final.

*Impacto esperado:* la implementación de esta solución de automatización tendrá varios impactos significativos y beneficios para la cervecería artesanal.

*Aumento de la eficiencia:* la automatización permitirá un aumento notable en la velocidad de producción y reducirá drásticamente el tiempo requerido para embotellar y tapar las botellas. Esto resultará en un aumento en la capacidad de producción diaria.

*Consistencia de calidad:* la calidad del producto final se mantendrá de manera constante, ya que la automatización reducirá al mínimo las variaciones humanas y los errores en el proceso.

*Reducción de costos:* la disminución del tiempo de producción y la minimización de las pérdidas durante el embotellado se traducirán en una reducción de costos operativos significativa a largo plazo.

*Continuidad de producción:* la cervecería podrá operar de manera continua sin depender de la presencia física del propietario, reduciendo así el riesgo de interrupciones en la producción.

*Optimización del espacio:* la solución se diseñó para que aproveche de manera eficiente el espacio disponible en la fábrica, maximizando la utilización de los recursos existentes.

*Aumento de ganancias:* la combinación de una mayor eficiencia y una reducción de costos se traducirá en un aumento de las ganancias mensuales para la cervecería artesanal.

La solución del proyecto de automatización tiene como objetivo mejorar significativamente la eficiencia operativa, la rentabilidad de la cervecería artesanal, al tiempo que garantiza la continuidad de la producción y la optimización del espacio disponible.

## **2. Marco de referencia**

En la industria cervecera, la eficiencia y la calidad son cruciales para mantenerse competitivo en un mercado en constante evolución. Uno de los aspectos clave de la producción

cervecería es el proceso de llenado y tapado de botellas o latas. La precisión en la medición del líquido, la esterilización adecuada, la velocidad de producción y la calidad del sellado son aspectos que influyen directamente en la satisfacción del cliente y en la rentabilidad de la cervecería.

En este contexto, la automatización se ha convertido en un componente esencial para muchas cervecerías modernas. La automatización no solo mejora la eficiencia y la consistencia en la producción, sino que también permite un mayor control de calidad y una capacidad de producción que se puede ajustar de manera más flexible para adaptarse a la demanda del mercado.

En este apartado, exploraremos a fondo los avances y las prácticas conocidas relacionadas con los sistemas automatizados utilizados en el llenado y tapado de cerveza. Desde el uso de tecnología de medición de nivel, hasta la implementación de sistemas de control y monitoreo en tiempo real, examinaremos cómo la automatización ha transformado este proceso fundamental en la industria cervecera.

## **2.1. Marco teórico**

### ***2.1.0. Proceso de llenado y tapado***

El proceso automatizado de llenado y tapado de cervezas es esencial en la industria cervecera para garantizar la eficiencia, la precisión y la calidad del producto final. A continuación, se describe cómo suele llevarse a cabo este proceso. [1]

*Transporte de botellas vacías:* el proceso comienza con la carga de botellas vacías en una cinta transportadora. Estas botellas suelen estar previamente lavadas y esterilizadas para garantizar la higiene.

*Llenado*

*Posicionamiento de botellas:* las botellas se posicionan bajo las boquillas de llenado mediante un sistema de guías y transportadores.

*Llenado:* la cerveza se bombea desde un tanque de almacenamiento hacia las boquillas de llenado. El control de flujo se regula cuidadosamente para garantizar que cada botella reciba la cantidad precisa de cerveza y se minimice la formación de espuma.

*Nivelado:* una vez que se llena la botella, un dispositivo de nivelación elimina cualquier exceso de líquido para garantizar que el nivel de llenado sea uniforme en todas las botellas. [2]

*Desaireación (opcional):* si se trata de cervezas carbonatadas, se puede realizar un proceso de desaireación para eliminar el aire de las botellas y mantener la carbonatación deseada.

### *Tapado*

*Posicionamiento de tapas:* las botellas llenas se mueven a una estación de tapado, donde se colocan las tapas sobre las botellas.

*Sellado:* dependiendo del tipo de envase, se aplican diferentes métodos de sellado:

*Tapas de corona:* las tapas de corona se colocan manualmente o mediante máquinas tapadoras que las presionan firmemente sobre el cuello de la botella.

*Tapas de rosca:* en el caso de botellas con tapas de rosca, se aplican mediante máquinas que enroscan la tapa de forma segura.

*Tapones de corcho:* en cervezas especiales, se utiliza corcho natural o sintético que se inserta manualmente en el cuello de la botella.

*Inspección:* después del llenado y tapado, las botellas pasan por una estación de inspección que verifica la integridad del sellado y la calidad general del producto. [6]

*Etiquetado y empaque:* las botellas llenas y tapadas se dirigen a una línea de etiquetado donde se aplican las etiquetas con información del producto y se empaquetan para su distribución. [3].

**Figura 1.** Máquina de llenado y tapado Cozzoli



Tomado [17]

El acero inoxidable es un material ampliamente utilizado en las máquinas de llenado y tapado de cerveza debido a sus propiedades únicas y beneficios para la industria cervecera. En la figura 1 podemos observar un ejemplo de la implementación de dicho material.

*Resistencia a la corrosión:* el acero inoxidable es altamente resistente a la corrosión, lo que es esencial en el entorno de producción de cerveza, donde se manejan líquidos y soluciones de limpieza a menudo. El acero inoxidable no se corroerá ni se oxidará, lo que garantiza la integridad estructural de las máquinas a lo largo del tiempo.

*Higiene y seguridad alimentaria:* en la producción de cerveza, la higiene y la seguridad alimentaria son críticas. El acero inoxidable es un material no poroso que es fácil de limpiar y desinfectar, evitando que los microorganismos o residuos de cerveza se adhieran a las superficies. Esto asegura la calidad y la pureza del producto final y reduce el riesgo de contaminación cruzada.

*Durabilidad:* las máquinas de llenado y tapado en la industria cervecera deben funcionar de manera confiable durante largos períodos de tiempo. El acero inoxidable es conocido por su durabilidad y resistencia al desgaste, lo que reduce el tiempo de inactividad y los costos de mantenimiento.

*Compatibilidad con bebidas alcohólicas:* el acero inoxidable es compatible con líquidos alcohólicos como la cerveza, ya que no reacciona químicamente con los componentes de la bebida. Esto evita cambios en el sabor o la calidad de la cerveza durante el proceso de llenado y tapado.

*Facilidad de fabricación:* el acero inoxidable es un material que se puede moldear y fabricar fácilmente en las formas y tamaños necesarios para las máquinas de llenado y tapado. Esto permite la creación de equipos personalizados para adaptarse a las necesidades específicas de la producción cervecera.

El acero inoxidable es el material preferido en las máquinas de llenado y tapado de cerveza debido a su resistencia a la corrosión, su capacidad de mantener altos estándares de higiene, su durabilidad y su compatibilidad con las características de las bebidas alcohólicas. Estas propiedades garantizan la calidad y la eficiencia en la producción de cerveza.

### ***2.1.1. El controlador lógico programable (PLC, por sus siglas en inglés)***

#### *Definición y función*

Un PLC es un dispositivo digital diseñado para controlar sistemas y procesos en entornos industriales. Su función principal es ejecutar programas de control predefinidos para realizar tareas como encender o apagar máquinas, regular la velocidad de un motor, controlar el flujo de líquidos, entre otros.

#### *Componentes principales*

*CPU (Unidad central de procesamiento):* es el cerebro del PLC y ejecuta el programa de control.

*Entradas y salidas (E/S):* conectan el PLC con el mundo exterior. Las entradas detectan señales del entorno (sensores), mientras que las salidas actúan sobre los dispositivos de salida (motores, válvulas, luces, etc.).

*Memoria:* almacena el programa de control y datos temporales.

*Interfaz de comunicación:* permite la conexión con otros dispositivos, como computadoras o sistemas de supervisión.

*Programación de PLC:* los PLC se programan utilizando lenguajes de programación específicos, como Ladder Logic (lenguaje basado en diagramas de contactos), Instruction List (lenguaje similar a ensamblador), o bloques de función (lenguaje de alto nivel). Los programadores definen las condiciones y acciones que el PLC debe seguir para controlar un proceso.

*Ciclo de escaneo:* el PLC realiza un ciclo de escaneo constante en el que lee las entradas, ejecuta el programa de control y actualiza las salidas. Este ciclo se repite a una velocidad definida, generalmente en milisegundos.

*Aplicaciones:* los PLC se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones industriales, como líneas de producción, control de robots, sistemas de control de climatización, máquinas herramientas, plantas de tratamiento de aguas, sistemas de elevación, etc.

#### *Ventajas*

*Flexibilidad:* los PLC son altamente adaptables y pueden reprogramarse para realizar diferentes tareas.

*Fiabilidad:* son dispositivos robustos diseñados para entornos industriales adversos.

*Facilidad de mantenimiento:* los programas pueden modificarse sin necesidad de reemplazar hardware.

*Evolución tecnológica:* los PLC modernos incorporan capacidades avanzadas, como conectividad a redes industriales, interfaces gráficas, almacenamiento de datos y capacidades de diagnóstico.

*Normativas de seguridad:* los PLC deben cumplir con estándares de seguridad industrial para evitar accidentes y garantizar el funcionamiento seguro de los sistemas controlados.

*Futuro de los PLC:* los PLC están evolucionando hacia soluciones más integradas y conectadas, como la Industria 4.0, donde la digitalización y la interconexión son clave. [4]

Un HMI (Interfaz de Usuario Humano, por sus siglas en inglés "Human-Machine Interface") es una tecnología que actúa como punto de contacto entre las personas y las máquinas o sistemas automatizados. Su objetivo principal es proporcionar una forma intuitiva y efectiva para que los usuarios interactúen, controlen y supervisen los procesos y dispositivos en entornos industriales, sistemas de automatización y maquinaria compleja. Aquí tienes una descripción más detallada del HMI:

#### *Características principales del HMI*

*Visualización de datos:* el HMI muestra información crítica en tiempo real a través de una interfaz gráfica. Esto puede incluir datos de sensores, estado de máquinas, indicadores de rendimiento, alarmas y más.

*Interacción táctil o visual:* la mayoría de los HMI modernos son pantallas táctiles que permiten a los usuarios interactuar directamente tocando, deslizando o seleccionando elementos en la pantalla. También pueden incluir botones físicos o teclados.

*Control y comando:* además de mostrar información, el HMI permite a los usuarios controlar sistemas y máquinas. Esto puede incluir iniciar o detener procesos, ajustar configuraciones y cambiar modos de operación.

*Alarmas y notificaciones:* los HMI pueden generar alarmas visuales o auditivas para alertar a los usuarios sobre condiciones anormales o eventos críticos en el proceso o sistema.

*Personalización:* los HMI a menudo permiten a los usuarios personalizar la visualización de datos según sus necesidades. Esto puede incluir la configuración de paneles de control personalizados.

*Seguridad y acceso autorizado:* los HMI suelen tener sistemas de seguridad integrados para garantizar que solo usuarios autorizados puedan realizar ciertas acciones o acceder a ciertas funciones.

*Conectividad:* los HMI están diseñados para conectarse a sistemas de control, PLC (Controladores Lógicos Programables) u otros dispositivos dentro de un entorno industrial. También pueden ser parte de redes de comunicación más amplias.

*Registro y registro de datos:* algunos HMI pueden llevar un registro de datos históricos y eventos, lo que es útil para el seguimiento, análisis y solución de problemas.

*Aplicaciones del HMI:* los HMI se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo:

*Industria manufacturera:* control de líneas de producción, máquinas CNC, robótica industrial, etc.

*Automatización de edificios:* control de sistemas de climatización, iluminación, seguridad, etc.

*Sector energético:* control de plantas de energía, subestaciones eléctricas, etc.

*Salud y medicina:* equipos médicos, dispositivos de laboratorio, etc.

*Automoción:* pantallas en vehículos, sistemas de infoentretenimiento, etc.

*Aeroespacial:* control de aeronaves, sistemas de navegación, etc.

En resumen, un HMI es una interfaz esencial en entornos industriales y de automatización que permite a los usuarios interactuar y controlar sistemas y procesos de manera eficiente y segura. Su diseño y funcionalidad pueden variar ampliamente según las necesidades específicas de la aplicación, y en la figura 2 se observa un modelo de HMI de la marca Siemens.

**Figura 2.** PLC con HMI



Tomado [18]

### 2.1.2. Actuadores

Los actuadores y sensores desempeñan un papel crucial en el proceso de llenado y tapado de envases en la industria de alimentos y bebidas, incluyendo la producción de cerveza, refrescos, agua embotellada y otros productos líquidos. Aquí te explicaré cómo se utilizan estos componentes en dicho proceso:

*Actuadores de llenado:* los actuadores, como los cilindros neumáticos, eléctricos o hidráulicos, se utilizan para controlar la cantidad de líquido que se dosifica en cada envase. Los actuadores se activan para abrir y cerrar las válvulas de llenado, permitiendo que el líquido fluya

y se detenga en el momento adecuado. Estos actuadores pueden ser altamente precisos para asegurar que cada envase se llene con la cantidad correcta de producto.

*Actuadores de tapado:* en el proceso de tapado, los actuadores se utilizan para aplicar tapas a los envases. Dependiendo del tipo de envase y de tapa utilizados, se pueden emplear diferentes tipos de actuadores, como brazos robóticos o cabezales de tapado automáticos. Los actuadores garantizan que las tapas se coloquen y sellen de manera adecuada y segura en cada envase. En la figura 3 se encuentran unos de los actuadores más utilizados en el mercado actual.

**Figura 3** Actuadores



Tomado [19]

### 2.1.3 Electroválvulas

Una electroválvula es un dispositivo electromecánico que controla el flujo de fluidos, como líquidos o gases, a través de un sistema.

*Principio de funcionamiento:*

Las electroválvulas utilizan un solenoide para abrir o cerrar una válvula. Cuando se aplica una corriente eléctrica al solenoide, este crea un campo magnético que actúa sobre una válvula, permitiendo o bloqueando el flujo del fluido.

### *Tipos de electroválvulas*

*Normalmente abiertas:* permite el flujo del fluido cuando se aplica energía al solenoide.

*Normalmente cerradas:* bloquea el flujo del fluido cuando se aplica energía al solenoide.

*De doble vía:* controla el flujo en ambas direcciones.

*De tres vías:* controla el flujo entre tres puertos.

### *Aplicaciones*

Las electroválvulas se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, desde sistemas de riego automático hasta sistemas de control industrial, sistemas de refrigeración, lavadoras, y más. [8]

### *Ventajas*

*Control preciso:* permiten un control preciso del flujo de fluidos.

*Rapidez de respuesta:* son rápidas en abrir y cerrar.

*Automatización:* facilitan la automatización de procesos.

*Eficiencia energética:* pueden reducir el consumo de energía al controlar el flujo según sea necesario.

## **2.1.4 Sensores**

*Sensores de nivel de llenado:* estos sensores se utilizan para medir el nivel de líquido en el envase durante el proceso de llenado. Pueden ser sensores ultrasónicos, capacitivos, de presión o de otro tipo. Cuando el nivel de llenado alcanza la cantidad deseada, el sensor envía una señal para detener el proceso de llenado y cerrar la válvula correspondiente.

*Sensores de tapado:* los sensores de tapado se utilizan para verificar si las tapas se han colocado correctamente en los envases y si están selladas de manera adecuada. Estos sensores

pueden detectar irregularidades en el proceso de tapado, como tapas faltantes o mal colocadas, lo que permite tomar medidas correctivas de inmediato.

*Sensores de presión y flujo:* estos sensores se utilizan para monitorear la presión y el flujo del líquido durante el proceso de llenado. Si se detectan anomalías, como una presión incorrecta o un flujo anormalmente rápido o lento, los sensores pueden detener el proceso o alertar al operador sobre posibles problemas.

*Sensores de posición:* los sensores de posición se utilizan para asegurarse de que los actuadores estén en la posición adecuada antes de realizar una acción, como abrir o cerrar una válvula de llenado o activar un cabezal de tapado. Esto evita errores en el proceso y garantiza una operación precisa y segura. Algunos de los sensores más utilizados en la industria se detallan en la figura 4.

### Figura 4 Sensores



Tomado [20]

Los actuadores y sensores desempeñan un papel esencial en el proceso de llenado y tapado de envases en la industria de alimentos y bebidas. Estos componentes permiten un control preciso y seguro de las operaciones, asegurando que los envases se llenen y cierren de manera adecuada y consistente, lo que contribuye a la calidad y la seguridad de los productos finales. [4]

### 2.1.5 Neumática

#### *Definición*

La neumática es una rama de la tecnología que utiliza aire comprimido para controlar y transmitir energía mecánica.

*Principio de funcionamiento:* la neumática se basa en el principio de la compresión y expansión del aire. Un compresor de aire comprime el aire atmosférico, que luego se almacena en un tanque a presión. El aire comprimido se utiliza para realizar tareas mecánicas, como mover cilindros, activar actuadores y controlar válvulas.

#### *Componentes principales*

*Compresor:* encargado de generar aire comprimido.

*Tanque de almacenamiento:* almacena el aire comprimido.

*Cilindros neumáticos:* dispositivos que convierten la energía del aire comprimido en movimiento mecánico lineal.

*Válvulas neumáticas:* controlan el flujo de aire y la dirección en el sistema neumático.

*Filtros y reguladores:* acondicionan el aire comprimido para garantizar su calidad y presión adecuada.

*Mangueras y conexiones:* transportan el aire entre los componentes.

#### *Ventajas*

*Rapidez:* los sistemas neumáticos son conocidos por su respuesta rápida.

*Capacidad de carga:* pueden manejar cargas pesadas.

*Seguridad:* son seguros en entornos explosivos debido a la falta de chispas.

*Costo eficiente:* los componentes neumáticos son relativamente económicos.

*Aplicaciones:* la neumática se utiliza en una variedad de aplicaciones industriales, como líneas de montaje, máquinas de embalaje, elevadores, puertas automáticas, entre otras, y en la figura 5 vemos un ejemplo de la implementación de la neumática en la industria. [8]

**Figura 5** *Neumática industrial*



Tomado [21]

### **2.1.6 Tanques de almacenamiento**

Los tanques de almacenamiento de bebidas carbonatadas son recipientes diseñados específicamente para mantener y conservar bebidas carbonatadas, como refrescos, sodas, cerveza con gas, y otras bebidas efervescentes. Estos tanques desempeñan un papel crucial en la producción y distribución de bebidas carbonatadas y ofrecen varias características clave: [9]

*Presión controlada:* los tanques de almacenamiento de bebidas carbonatadas están diseñados para resistir y mantener la presión generada por el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) disuelto en la bebida. Esto es esencial para mantener la carbonatación y la frescura del producto.

*Material resistente:* por lo general, están fabricados con acero inoxidable de alta calidad, que es resistente a la corrosión y no reacciona químicamente con el CO<sub>2</sub>, garantizando la integridad del sabor y la calidad del producto.

*Aislamiento térmico:* muchos tanques de almacenamiento están equipados con aislamiento térmico para mantener la temperatura de la bebida dentro de un rango óptimo, lo que es especialmente importante para la cerveza y otras bebidas sensibles a la temperatura.

*Válvulas y accesorios:* estos tanques suelen contar con válvulas y accesorios que permiten la carga de CO<sub>2</sub> para mantener la carbonatación, la extracción de la bebida para llenado de envases y la limpieza del tanque.

*Capacidad y tamaño variados:* los tanques de almacenamiento pueden variar en capacidad, desde pequeños tanques utilizados en bares hasta grandes silos utilizados en plantas de producción a gran escala.

*Seguridad:* deben cumplir con estándares de seguridad para proteger contra fugas de gas CO<sub>2</sub> y posibles riesgos de presión.

*Limpieza y mantenimiento:* los tanques deben ser fáciles de limpiar y mantener para garantizar la calidad y la higiene de la bebida almacenada.

*Distribución y envasado:* desde estos tanques, las bebidas carbonatadas se pueden distribuir a máquinas de llenado y tapado para envasarlas en botellas, latas u otros envases.

Los tanques de almacenamiento de bebidas carbonatadas que se pueden visualizar en la figura 6 son esenciales en la industria de bebidas, ya que permiten mantener la consistencia en el sabor y la carbonatación del producto, además de facilitar su distribución y envasado. Su diseño y características están diseñados específicamente para satisfacer las necesidades de conservación y manejo de bebidas efervescentes.

**Figura 6** Tanques de almacenamiento para bebidas carbonatadas.



Tomado [22]

### 2.1.7 Mecánica de fluidos

La mecánica de fluidos es una rama de la física que estudia el comportamiento de los fluidos en reposo (estática) y en movimiento (dinámica). Los fluidos, como líquidos y gases, se caracterizan por su capacidad para fluir y adaptarse a la forma de su contenedor. [13]

Algunos conceptos clave en mecánica de fluidos son:

*Fluido:* un fluido es una sustancia que puede fluir y no mantiene su forma, adaptándose al contenedor que lo contiene. Los líquidos y los gases son ejemplos de fluidos.

*Caudal:* el caudal es la cantidad de fluido que pasa por un punto dado en un período de tiempo. Se mide en unidades de volumen por unidad de tiempo, como litros por segundo o metros cúbicos por hora. El caudal se puede calcular multiplicando el área de la sección transversal del flujo por la velocidad del fluido.

*Presión:* la presión en un fluido es la fuerza por unidad de área que ejerce el fluido sobre una superficie. Se expresa comúnmente en unidades de pascal (Pa) en el Sistema Internacional de Unidades. La presión en un punto dentro de un fluido varía debido a la altura del fluido sobre ese punto, la velocidad del fluido y la fuerza ejercida sobre él.

*Ecuación de continuidad:* la ecuación de continuidad establece que, para un flujo estacionario de fluido incompresible, la masa que entra en una sección de tubería debe ser igual a la masa que sale. Esto se basa en el principio de conservación de la masa y se expresa como [13]

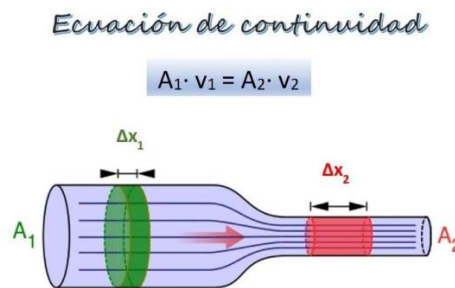
$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Donde,

$A$  es el área de la sección transversal y

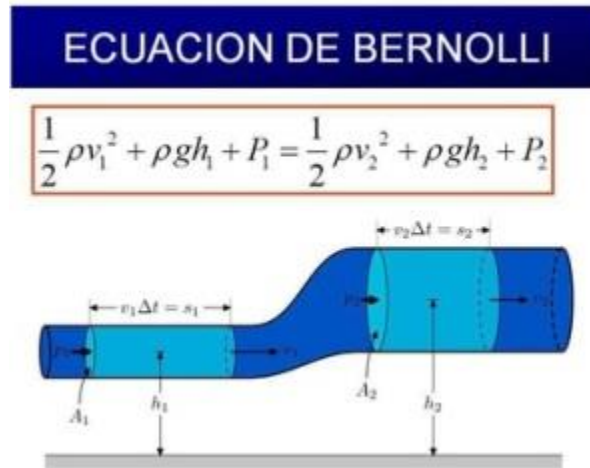
$v$  es la velocidad del fluido.

**Figura 7** Ecuación de continuidad



Tomado [23]

*Ecuación de Bernoulli:* la ecuación de Bernoulli describe la relación entre la presión, la velocidad y la altura de un fluido en movimiento a lo largo de una línea de corriente. Es útil para analizar flujos en los que la energía mecánica se transforma entre energía cinética, energía potencial y energía de presión.

**Figura 8** Ecuación de Bernoulli

Tomado [24]

La ecuación de Bernoulli se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + Pgh = cte$$

Donde:

$P$  es la presión del fluido en el punto considerado.

$\rho$  es la densidad del fluido.

$v$  es la velocidad del fluido en el punto considerado.

$g$  es la aceleración debida a la gravedad.

$h$  es la altura del punto considerado con respecto a un nivel de referencia.

La ecuación de Bernoulli establece que la suma de la presión estática, la presión dinámica (asociada con la velocidad del fluido) y la energía potencial por unidad de masa del fluido es constante a lo largo de una línea de corriente.[12]

En resumen, la ecuación de Bernoulli es una herramienta esencial en la mecánica de fluidos que permite comprender y analizar el comportamiento de los fluidos en movimiento, y puede

aplicarse en una amplia gama de situaciones, incluido el cálculo del tiempo de llenado en procesos industriales como el llenado isobárico de cerveza.

### **2.1.8 Resistencia materiales**

La resistencia de materiales es una rama de la ingeniería mecánica que se ocupa del comportamiento de los materiales cuando se someten a diferentes tipos de cargas y fuerzas externas. Su objetivo principal es garantizar que las estructuras y componentes diseñados sean capaces de soportar las cargas y fuerzas a las que estarán expuestos durante su funcionamiento sin sufrir deformaciones excesivas o fallas catastróficas.

Algunos conceptos clave en resistencia de materiales incluyen:

*Esfuerzo:* el esfuerzo es la fuerza aplicada por unidad de área de un material. Se mide en unidades de presión, como pascales (Pa) o megapascuales (MPa). Existen diferentes tipos de esfuerzos, como el esfuerzo normal (tensión o compresión) y el esfuerzo cortante.[12]

*Deformación:* la deformación es el cambio en la forma o el tamaño de un material debido a la aplicación de una carga o fuerza. Se puede medir como un cambio relativo en longitud (deformación unitaria) o como un cambio angular en el caso de esfuerzos cortantes.

*Módulo de elasticidad:* el módulo de elasticidad, también conocido como módulo de Young, es una medida de la rigidez de un material. Indica la capacidad de un material para deformarse elásticamente bajo la acción de una carga y luego regresar a su forma original una vez que se retira la carga.

*Diagrama esfuerzo-deformación:* es una representación gráfica que muestra la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación resultante en un material. Esta curva es útil para

comprender el comportamiento elástico y plástico de un material, así como su resistencia última y su punto de fractura.

*Factor de seguridad:* el factor de seguridad es una medida de la capacidad de diseño de una estructura o componente. Se define como la relación entre la carga máxima que puede soportar la estructura sin fallar y la carga máxima esperada en condiciones de funcionamiento normales. Un factor de seguridad alto indica un diseño conservador y seguro.

La ecuación de empotramiento perfecto es una expresión utilizada en el análisis estructural para describir las condiciones de contorno en las que una estructura está perfectamente fijada o empotrada en un extremo. Esto significa que la estructura no puede moverse ni girar en absoluto en ese punto.

Matemáticamente, la ecuación de empotramiento perfecto se puede expresar como:

$$y(x)=0$$

$$M(x)=0$$

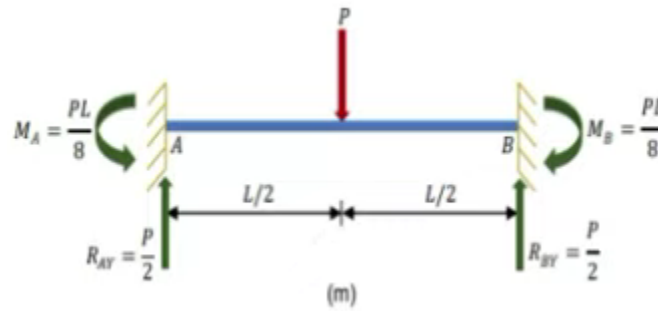
Donde:

$y(x)$  es el desplazamiento vertical en el punto de empotramiento.

$M(x)$  es el momento en el punto de empotramiento.

Estas condiciones de contorno indican que el desplazamiento vertical y el momento en el punto de empotramiento son iguales a cero, lo que significa que la estructura está completamente restringida en ese punto y no puede moverse ni girar bajo ninguna carga o fuerza externa.

El empotramiento perfecto se utiliza comúnmente en el análisis de vigas, marcos y otros tipos de estructuras para modelar conexiones fijas o empotradas en un extremo. Es una suposición importante en el diseño y análisis de estructuras para garantizar la estabilidad y seguridad de la construcción.

**Figura 9** Ecuación de empotramiento perfecto.

Tomado [25]

### 2.1.9 Normativas según la ISA(International Society Automation)

La norma ISA-88, también conocida como "Batch Control", es un estándar internacional desarrollado por la Sociedad Internacional de Automatización (ISA) que proporciona un marco para el diseño y la implementación de sistemas de control de procesos batch. Está dirigido principalmente a industrias como la química, farmacéutica, alimentaria y de bebidas, donde se utilizan procesos batch para la fabricación de productos. [14]

La norma ISA-88 define un conjunto de modelos y terminología estandarizados que permiten la interoperabilidad entre los sistemas de control de proceso batch, facilitando así la comunicación y la integración entre diferentes equipos y sistemas. Estos modelos se dividen en tres partes principales:

*Modelo de proceso:* define los elementos fundamentales del proceso batch, incluyendo unidades de equipo (como tanques, reactores, y evaporadores), recetas (que describen las secuencias de operación y los parámetros de proceso), y procedimientos de operación (que guían al operador a través del proceso).

*Modelo de procedimiento:* describe la secuencia lógica de acciones que deben realizarse para ejecutar una receta de proceso batch. Este modelo incluye fases (como pre-ejecución,

ejecución y post-ejecución), unidades de equipo de control (que controlan la ejecución de las recetas en el equipo físico), y operaciones de proceso (como mezclar, calentar y enfriar).

*Modelo de recursos:* define los recursos físicos y lógicos necesarios para ejecutar un proceso batch, incluyendo equipos, materiales, recetas y procedimientos. Este modelo facilita la asignación de recursos y la planificación de la producción en un entorno batch.

La norma ISA-88 proporciona beneficios significativos en la industria al estandarizar la forma en que se diseñan, implementan y operan los sistemas de control de procesos batch. Al seguir los principios y directrices establecidos en esta norma, las organizaciones pueden mejorar la eficiencia, la calidad y la flexibilidad de sus operaciones de fabricación batch. Además, la norma ISA-88 fomenta la reutilización de componentes de control y la interoperabilidad entre sistemas, lo que puede reducir los costos y el tiempo de desarrollo de nuevos sistemas batch.[14]

El término "batch" se refiere a un método de producción en el que se fabrican productos en lotes discretos, en contraposición a la producción continua. En un proceso batch, se realiza una cantidad específica de productos durante una sola ejecución del proceso, y luego se detiene la producción hasta que se inicie un nuevo lote.

Este enfoque es común en una variedad de industrias, incluyendo la química, farmacéutica, alimentaria, de bebidas, cosmética, entre otras. Algunos ejemplos de procesos batch incluyen la fabricación de medicamentos, la producción de alimentos envasados, la elaboración de cerveza y la producción de productos químicos.

En un proceso batch, cada lote de producto puede tener características únicas y puede requerir condiciones de proceso específicas. Esto contrasta con la producción continua, donde los productos se fabrican de manera constante y uniforme sin interrupción.

Los procesos batch ofrecen varias ventajas, como la capacidad de producir una variedad de productos con un mismo equipo, la flexibilidad para cambiar entre productos y la posibilidad de realizar pruebas y ajustes en pequeñas cantidades antes de producir en gran escala. Sin embargo, también pueden tener desafíos en términos de eficiencia y tiempo de ciclo, ya que requieren tiempos de preparación y limpieza entre lotes.

La norma ISA101, también conocida como ANSI/ISA-101.01-2015, "Human Machine Interfaces for Process Automation Systems", es una norma desarrollada por la Sociedad Internacional de Automatización (ISA) que establece las mejores prácticas y directrices para el diseño y la implementación de interfaces HMI en sistemas de automatización de procesos.[14]

Algunos de los aspectos clave abordados por la norma ISA101 incluyen:

*Principios de diseño:* la norma proporciona principios de diseño centrados en el usuario para crear interfaces HMI efectivas y fáciles de usar. Estos principios se basan en la comprensión de las necesidades y habilidades del usuario final.

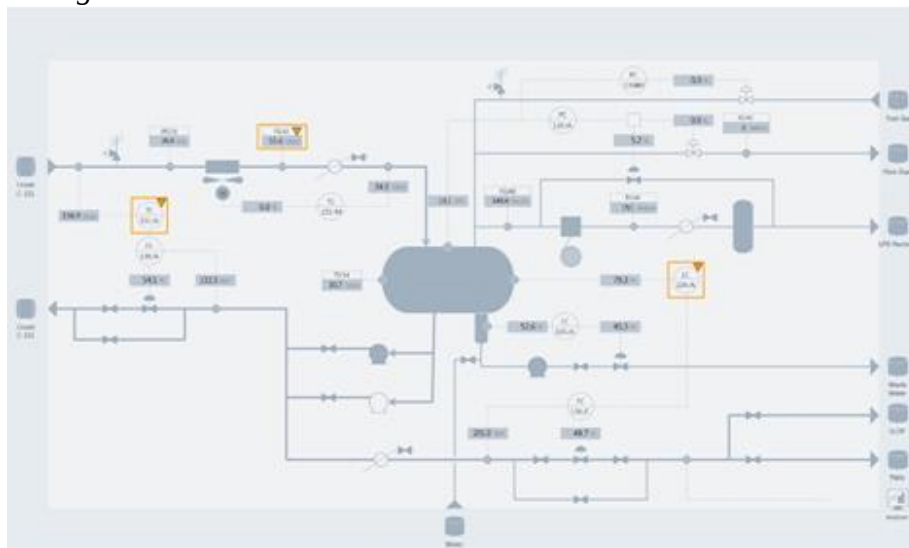
*Organización de la información:* se ofrecen directrices sobre cómo organizar y presentar la información de manera clara y comprensible para el operador. Esto incluye la disposición de elementos gráficos, etiquetas y colores para mejorar la legibilidad y la comprensión.

*Alarmas:* la norma aborda la gestión de alarmas, incluida la clasificación, presentación y gestión de alarmas para ayudar al operador a identificar y responder rápidamente a las condiciones anormales del proceso.

*Navegación:* se proporcionan recomendaciones sobre la navegación dentro de la interfaz HMI para facilitar la localización y el acceso a la información relevante.

*Mejoras de rendimiento:* la norma incluye directrices para mejorar el rendimiento del operador, como el uso de controles interactivos y la minimización de la carga cognitiva.[14]

**Figura 10** *HMI según la normativa ISA101*



Tomado [26]

La norma ISA101 es una valiosa referencia para diseñadores, ingenieros y usuarios finales que desean crear interfaces HMI eficientes y fáciles de usar para sistemas de automatización de procesos. Al seguir las directrices establecidas en esta norma, se puede mejorar la eficiencia operativa, reducir los errores humanos y aumentar la seguridad en el entorno industrial.

## 2.2. Marco legal

En Colombia, como en muchos otros países, el proceso de automatizado para el llenado y tapado de cervezas está sujeto a una serie de regulaciones y leyes que se enfocan en garantizar la seguridad alimentaria, la calidad del producto y el cumplimiento de estándares de fabricación. Estas leyes y regulaciones son administradas principalmente por el Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (INVIMA) y pueden incluir las siguientes áreas:

*Seguridad alimentaria:* cumplimiento con las regulaciones de seguridad alimentaria establecidas por el Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (INVIMA).

Cumplimiento de Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) y sistemas de gestión de la calidad.

*Etiquetado y envase:* cumplimiento con las regulaciones de etiquetado de productos alimenticios, incluyendo información obligatoria como contenido alcohólico, fecha de caducidad y contenido nutricional.

*Impuestos y regulación fiscal:* cumplimiento con las tarifas y regulaciones fiscales aplicables a la producción y venta de cervezas, incluyendo impuestos especiales sobre bebidas alcohólicas.

*Normativas de control de calidad:* cumplimiento con los estándares y regulaciones de calidad establecidos para la producción de cerveza, incluyendo la composición de ingredientes permitidos y prácticas de elaboración.

*Comercialización y distribución:* cumplimiento con las regulaciones de comercialización y distribución, que pueden incluir restricciones de horarios de venta, publicidad y patrocinio, y la prevención de la venta de alcohol a menores de edad.

*Control de precios:* cumplimiento con regulaciones de control de precios, si corresponde, que puedan afectar la fijación de precios y los márgenes de ganancia en la venta de cerveza.

*Normativas de seguridad laboral:* cumplimiento con las normativas de seguridad laboral para proteger a los trabajadores que operan y mantienen las máquinas de llenado y tapado.

*Registro y licencias:* obtención de todas las licencias y permisos requeridos para operar una planta de producción de cerveza y utilizar equipos automatizados de llenado y tapado.

*Cumplimiento ambiental:* cumplimiento con regulaciones ambientales relacionadas con el manejo de residuos y la gestión sostenible de los recursos utilizados en el proceso.

Estas regulaciones y leyes están diseñadas para garantizar la calidad y la seguridad de los productos, proteger la salud pública y promover prácticas comerciales justas en la industria cervecera en Colombia. Las empresas que producen y comercializan cerveza en el país deben cumplir con estas regulaciones para operar legalmente y garantizar la satisfacción de los consumidores. Además, es importante mantenerse actualizado sobre las regulaciones específicas que puedan cambiar con el tiempo para garantizar el cumplimiento continuo.

#### **2.4. Marco tecnológico y científico (estado del arte)**

La industria cervecera artesanal ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, lo que ha impulsado la necesidad de optimizar los procesos de producción. En este contexto, la automatización en el llenado y tapado de botellas ha surgido como una solución clave para mejorar la eficiencia, mantener la calidad del producto y garantizar la satisfacción del cliente. El estado del arte se enfoca en las tecnologías y prácticas relacionadas con la automatización en este sector específico.

*Automatización en la industria cervecera artesanal:* la automatización se ha convertido en una estrategia esencial para aumentar la capacidad de producción y la consistencia en la industria cervecera artesanal.

Los sistemas automatizados de llenado y tapado de botellas permiten un control preciso sobre el proceso, minimizando el riesgo de contaminación y mejorando la eficiencia.

*Llenado isobárico como técnica destacada:* el llenado isobárico es una técnica ampliamente adoptada en la industria cervecera para mantener la calidad del producto. Este enfoque implica llenar las botellas a una presión constante, lo que minimiza la formación de espuma y preserva las propiedades sensoriales de la cerveza.

Partiendo de uno de los proyectos realizados anteriormente con este enfoque [10], se destaca el éxito de la implementación del sistema de llenado isobárico en la cervecería artesanal. En dónde se logró una reducción significativa en el tiempo de llenado, pasando de 189 segundos a 31,25 segundos por botella. Las pruebas confirmaron la eficacia del sistema, y su capacidad de operación continua mejoró la eficiencia y la calidad del proceso. Además, se aseguró el cumplimiento de los estándares de calidad, garantizando que cada botella tenga la presión adecuada. En conjunto, estos resultados demuestran que el proyecto fue un éxito al mejorar la eficiencia y la calidad en el proceso de llenado de botellas en la cervecería artesanal.

Otro de los proyectos que hacen parte de la automatización en la industria cervecera y que es importante resaltar, es el trabajo realizado por la Universidad del Valle de Guatemala que ha desarrollado un sistema de envasado manual para botellas de cerveza de vidrio de 355 mL en su planta piloto. Este sistema utiliza el método de diferencia de presiones, donde se integran un tanque de cerveza carbonatada, un tanque de dióxido de carbono y una pistola llenadora de cerveza. Los resultados obtenidos de tres lotes de producción revelaron un volumen promedio de envasado de  $14.08 \pm 0.35$  L, con un tiempo promedio de llenado por botella de 355 mL de  $151.98 \pm 25.54$  segundos y un tiempo promedio total de envasado por lote de  $1.67 \pm 0.05$  horas. La capacidad promedio de envasado se calculó en  $23.71 \pm 0.24$  botellas por hora.

Adicionalmente, se implementó un riguroso proceso de limpieza y sanitización tanto del equipo como de las botellas utilizadas en el proceso de envasado. Para garantizar una eficiencia óptima, se elaboró un manual técnico que detalla los procedimientos de limpieza y control.

Sin embargo, es importante destacar que el sistema de envasado manual presentó una merma promedio del  $11.65 \pm 1.30\%$ , lo cual es una limitación importante en comparación con sistemas automatizados. Esta merma se debe, en parte, a la dificultad de medir con precisión el

volumen de cerveza envasada en botellas de formas variadas, ya que la medición se basa en la altura de la cerveza en la botella. Por lo tanto, se recomienda la utilización de botellas uniformes o la adquisición de envases nuevos y uniformes para mejorar la eficiencia del proceso de envasado."

De este proyecto se concluyó que:

*Diseño de un sistema manual versátil:* la Universidad del Valle de Guatemala diseñó un sistema manual capaz de llenar botellas de cerveza de diferentes tamaños y formas. Esta versatilidad es esencial en un entorno de cervecería artesanal, donde es común trabajar con botellas variadas.

*Método de diferencia de presiones:* se implementó el método de diferencia de presiones, utilizando un tanque de cerveza carbonatada, un tanque de dióxido de carbono y una pistola llenadora de cerveza. Este enfoque puede servir como referencia para proyectos similares que busquen una solución de envasado eficaz y económica.

*Resultados eficientes:* los resultados obtenidos demostraron una eficiencia aceptable en términos de volumen promedio de embotellado, tiempo promedio de llenado por botella y capacidad promedio de envasado por hora. Estos indicadores son esenciales para evaluar el rendimiento de un sistema de envasado.

*Limpieza y sanitización:* la implementación de un proceso de limpieza y sanitización adecuado es crucial para mantener la calidad de la cerveza envasada. Un manual técnico detallado para el control y procedimiento de limpieza puede servir como guía para garantizar la higiene en la línea de envasado.

*Pérdidas de volumen:* es importante destacar que el sistema de envasado manual resultó en una merma promedio del  $11.65 \pm 1.30\%$ . Este hallazgo resalta la necesidad de abordar las pérdidas

de volumen al considerar la automatización. Proyectos futuros pueden aspirar a reducir estas pérdidas para mejorar la eficiencia operativa y la rentabilidad.

*Desafíos con envases variados:* el sistema de envasado manual enfrentó dificultades al determinar con precisión el volumen de cerveza en botellas de formas variadas debido a la medición basada en la altura de la cerveza en la botella. Esta observación subraya la importancia de utilizar botellas uniformes o explorar soluciones de medición más precisas en proyectos de automatización. [11]

## **2.5. Condiciones iniciales del proyecto**

*Los antecedentes del proyecto:* el proyecto surge a raíz de la necesidad del propietario de una cervecería artesanal en Colombia de mejorar la eficiencia de su fábrica de cerveza artesanal. La principal limitación identificada estaba en el proceso de embotellado y tapado, que se había convertido en un cuello de botella crítico para la producción.

*Situación inicial:* en su estado inicial, la cervecería artesanal opera con un sistema de embotellado y tapado totalmente manual y rudimentario. Este enfoque no solo consume una cantidad significativa de tiempo, sino que también requiere un esfuerzo físico considerable. Además, dado que el propietario es la única persona capacitada para realizar estas tareas, cualquier ausencia de su parte detenía por completo la producción de cerveza, lo que resultaba en pérdidas mensuales significativas en las ganancias.

*Necesidades del propietario:* el propietario tenía objetivos claros para el proyecto de automatización.

*Reducción de pérdidas:* buscaba reducir las pérdidas asociadas con el proceso de embotellado, tanto en términos de tiempo como de materia prima.

*Continuidad de la producción:* necesita garantizar que la producción de cerveza no se detenga en caso de su ausencia o incapacidad para realizar las tareas de embotellado y tapado.

*Optimización del espacio:* dada la limitación de espacio en la fábrica, es esencial diseñar una solución que aprovechara al máximo el espacio disponible para ubicar la maquinaria de embotellado y tapado.

*Búsqueda de solución:* para abordar estos desafíos, el propietario buscó la asesoría de ingenieros mecánicos altamente competentes. Se requería una solución viable que automatizara eficazmente el proceso de embotellado y tapado, manteniendo al mismo tiempo los altos estándares de calidad de la cerveza artesanal. El objetivo era mejorar la eficiencia operativa, reducir costos y garantizar la continuidad de la producción sin comprometer la calidad del producto final.

El propietario cuenta con líneas de suministro de cerveza y CO<sub>2</sub>, así como una línea de presión neumática, lo que proporciona una infraestructura existente que será considerada en el diseño del sistema. Estas líneas de suministro serán elementos fundamentales para el correcto funcionamiento del sistema de llenado y tapado de botellas de cerveza.

La línea de suministro de cerveza proporcionará el producto a ser envasado en las botellas, mientras que la línea de suministro de CO<sub>2</sub> se utilizará para el proceso de carbonatación y presurización de las botellas. Por otro lado, la línea de presión neumática será esencial para el accionamiento de los cilindros neumáticos y otras componentes del sistema electro neumático.

Al tener en cuenta estas líneas de suministro existentes, se podrá diseñar el sistema de llenado y tapado de botellas de cerveza de manera eficiente, aprovechando al máximo los recursos disponibles y garantizando una integración adecuada con la infraestructura preexistente. Esto

contribuirá a la optimización del proceso de producción y a la mejora de la eficiencia operativa en general.

En la figura 7 podemos contemplar el método poco eficiente utilizado para llenar y tapar las cervezas en la cervecería artesanal.

**Figura 11.** *Máquina actual para el proceso de llenado y tapado*



### 3. Diseño metodológico

La metodología de este proyecto está diseñada para alcanzar los objetivos específicos propuestos y obtener resultados satisfactorios. Se estructura de manera lógica y de ingeniería, abarcando todas las etapas desde la revisión bibliográfica inicial hasta la presentación de los resultados finales. A continuación, se describen las principales actividades que conforman el diseño experimental:

#### 3.1 Investigación

Se llevará a cabo una investigación de la literatura relacionada con la automatización en la industria cervecera, el llenado y tapado de botellas, y las tecnologías mecatrónicas aplicadas a

estos procesos. Esto proporcionará una base sólida para comprender las mejores prácticas y los desafíos existentes en el campo.

### **3.2 Diseño del sistema**

Se realizará el diseño detallado del sistema automatizado propuesto para el llenado y tapado de botellas de cerveza artesanal. Esto incluirá la selección de componentes mecatrónicos, eléctricos y de control necesarios, así como la elaboración de esquemas y diagramas.

### **3.3 Simulación**

Se empleará software de simulación, como SOLIDWORKS, TIA PORTAL, WINCC RT SIMULATOR, PLCSIM, NETTOPLCSIM, FLUIDSIM, KEPSEVER, para modelar y simular el sistema propuesto. Esto permitirá evaluar su funcionamiento teórico, y prever posibles problemas.

### **3.4 Pruebas**

Se realizarán pruebas virtuales para validar el funcionamiento del sistema. Esto incluirá la simulación de diversos escenarios de producción y la evaluación de variables clave, como tiempo de llenado.

### **3.5 Análisis de datos**

Los datos generados durante las pruebas virtuales se analizarán utilizando el entorno de simulación. Se evaluará el desempeño del sistema.

### 3.6 Interpretación y presentación de resultados

Los resultados obtenidos de las simulaciones se interpretarán en el contexto de los objetivos específicos del proyecto. Se generarán informes técnicos y gráficos para presentar de manera clara y concisa los hallazgos y conclusiones.

Esta metodología integral y secuencial asegurará un enfoque sistemático para alcanzar los objetivos del proyecto y contribuir al avance en la automatización de procesos en la industria cervecera artesanal.

### 3.7 Criterios de diseño

En esta sección, se presenta una descripción detallada del sistema diseñado para automatizar el llenado y tapado en la cervecería artesanal. Cada componente será analizado, revelando las razones detrás de cada elección. Este análisis no solo aborda las características técnicas de la maquinaria, sino que también explora el razonamiento estratégico que ha guiado su desarrollo.

Cada elemento, ha sido seleccionado con precisión para satisfacer requisitos específicos y abordar desafíos únicos en el contexto de la cervecería artesanal. Las decisiones relacionadas con la capacidad de producción, la selección de materiales y la optimización de procesos se explicarán de manera clara y concisa, brindando una visión integral del diseño propuesto.

*Diseño y estructura de la máquina:* en el contexto de una cervecería artesanal con limitaciones espaciales, se ha concebido un diseño preliminar del armazón de la máquina de llenado y tapado. La restricción de un área de trabajo de aproximadamente  $1.5m^2$  es un factor clave en el desarrollo de este proyecto. La estructura fue diseñada para alojar eficientemente dos estaciones: una para el llenado y otra para el tapado, maximizando así la utilidad del espacio

disponible. Dado el entorno de la industria alimentaria, se ha optado por utilizar predominantemente acero inoxidable debido a sus propiedades higiénicas y duraderas.

*Capacidad y optimización de proceso:* considerando la necesidad de reducir los tiempos de envasado y aumentar la productividad, se ha seleccionado una capacidad de llenado y tapado simultáneo de 6 botellas. Esta elección se sustenta en la implementación de un proceso de llenado isobárico y en la cantidad de componentes necesarios, como las electroválvulas de CO<sub>2</sub> y cerveza, así como la electroválvula de escape. El diseño de la máquina se ha optimizado para acomodar eficientemente todos estos componentes.

*Distribución de componentes:* en la parte superior de la estructura se han ubicado las electroválvulas responsables del sistema de llenado, así como los componentes neumáticos necesarios para el movimiento de los cilindros. Estos cilindros, por su parte, facilitan el desplazamiento de las bases que contienen las boquillas de llenado en una estación y las tapas tipo corona en la otra. Este enfoque permitirá llenar y tapar las botellas de manera simultánea, optimizando así el rendimiento del sistema.

*Movimiento y precisión:* para el desplazamiento de las botellas entre las dos estaciones, se ha elegido una guía lineal con rodamiento. Esta elección se basa en su precisión, tamaño y simplicidad de implementación, características ampliamente utilizadas en la automatización industrial. Un motor DC controla el movimiento de la guía lineal, asegurando que las botellas estén alineadas correctamente con las boquillas de llenado y las tapas. Las botellas se colocarán en una placa base que contiene 6 agujeros, garantizando su estabilidad durante el proceso de llenado y tapado.

Este diseño se presenta como una solución integral, considerando tanto las restricciones físicas del entorno como los requisitos específicos del proceso de producción de cerveza artesanal.

La elección de materiales y componentes se ha guiado por la necesidad de eficiencia, higiene y durabilidad, buscando optimizar la operación y la productividad de la máquina.

*Sistema eléctrico y neumático:* el sistema consta de dos cilindros neumáticos encargados de las etapas de llenado y tapado, controlados por electroválvulas que regulan el flujo de cerveza y Co2. La presión de trabajo se estableció en 2 bares para ambos cilindros, basándose en investigaciones previas que indicaron la necesidad de esta presión para el proceso de tapado y llenado. Además, se seleccionó un cilindro capaz de manejar una carga total de aproximadamente 8kg, que incluye el peso de las boquillas y la base.

El sistema eléctrico comprende una fuente de alimentación AC/DC, un PLC S7-1200, HMI, sensores reflexivos tipo PNP, finales de carrera y módulos de E/S. Se utilizan sensores y finales de carrera para detectar la presencia de botellas y posicionar los cilindros, junto con un motor DC de 24V para el movimiento horizontal.

A continuación, se muestran los diferentes componentes utilizados en el sistema.

**Figura 12.** Fuente de alimentación

| Componente                                                                          |                                                                                                                                                                                                                           | Cantidad          |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
|  | S7-1200 PM1207                                                                                                                                                                                                            | 1                 |
|                                                                                     | <b>Características</b>                                                                                                                                                                                                    | <b>Referencia</b> |
|                                                                                     | - Tipo: 24 V/2.5 A                                                                                                                                                                                                        | 6EP1332-1SH71     |
|                                                                                     | - Voltaje de entrada: Dependiendo de la red eléctrica local (por ejemplo, 110V AC, 220V AC).<br>- Voltaje de salida: 24V DC (para alimentar el PLC, HMI, sensores, módulos de E/S y otros dispositivos).<br>Adaptado [15] |                   |

Figura 13. PLC

| Componente                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Cantidad           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
|  | SIMATIC S7-1200, CPU 1214C, AC/DC/RLY                                                                                                                                                                                                                                                 | 1                  |
|                                                                                   | <b>Características</b>                                                                                                                                                                                                                                                                | <b>Referencia</b>  |
|                                                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Marca: Siemens</li> <li>- Tipo: Controlador Lógico Programable</li> <li>- Amplia gama de E/S digitales y analógicas.</li> <li>- Comunicación Ethernet para integración con otros dispositivos y supervisión remota.</li> </ul> Adaptado [15] | 6ES7214-1BG40-0XB0 |

Figura 14. HMI

| Componente                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                          | Cantidad           |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
|  | SIMATIC HMI, KTP700 BASIC, BASIC PANEL                                                                                                                                                                                                   | 1                  |
|                                                                                    | <b>Características</b>                                                                                                                                                                                                                   | <b>Referencia</b>  |
|                                                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo: Interfaz Hombre-Máquina</li> <li>- Marca: Siemens</li> <li>- Pantalla táctil para interactuar con el sistema de control y visualizar información en tiempo real.</li> </ul> Adaptado [15] | 6AV2123-2GB03-0AX0 |

Figura 15. Sensor Reflex

| Componente                                                                          |                                                                                                                                                                                         | Cantidad          |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
|  | Sensores Reflexivos                                                                                                                                                                     | 6                 |
|                                                                                     | <b>Características</b>                                                                                                                                                                  | <b>Referencia</b> |
|                                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo: PNP (Positivo-Negativo-Positivo) Modelo SRX-200</li> <li>- Utilización: Para detectar la presencia de botellas. Adaptado [16]</li> </ul> | Modelo SRX-200    |

**Figura 16.** *Final de carrera*

|  | Componente                                                                                                                        | Cantidad                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
|                                                                                   | Finales de Carrera                                                                                                                | 6                             |
|                                                                                   | <b>Características</b><br>- Utilización: Para detectar la posición de los cilindros y de la bandeja de botellas.<br>Adaptado [16] | <b>Referencia</b><br>XZ-15GW3 |

**Figura 17.** *Breaker*

|  | Componente                                                                                                                                                                                                         | Cantidad                       |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|                                                                                    | Breaker (TACO) Tripolar Riel Chint                                                                                                                                                                                 | 1                              |
|                                                                                    | <b>Características</b><br>- Utilización: Protege el sistema eléctrico contra sobrecargas y cortocircuitos.<br>No. de Polos: 3<br>Capacidad de Ruptura: 6KA<br>Voltaje: 230/400V<br>Montaje: Riel DIN Adaptado [16] | <b>Referencia</b><br>NXB-63C32 |

**Figura 18.** *Electroválvula*

|  | Componente                                                                                                                                                                                                                                                                 | Cantidad          |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
|                                                                                     | Electroválvula ½" N.C 12/24V                                                                                                                                                                                                                                               | 18                |
|                                                                                     | <b>Características</b><br>- Tipo: Controlan el flujo de cerveza y CO2 en el sistema, y el flujo de salida.<br>- Operadas eléctricamente para control preciso del flujo.<br>- Tamaño de conexión compatible con la tubería de suministro de cerveza y CO2.<br>Adaptado [16] | <b>Referencia</b> |

**Figura 19.** *Cilindro doble efecto*

| Componente                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Cantidad          |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
|  | Cilindros                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 2                 |
|                                                                                   | <b>Características</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <b>Referencia</b> |
|                                                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo: Neumáticos Doble efecto</li> <li>- Presión de trabajo: 2 bares</li> <li>- Capacidad de carga: Capaz de manejar una carga total de aproximadamente 8kg.</li> <li>- Función: Un cilindro para la etapa de llenado y otro para la etapa de tapado. Adaptado [16]</li> </ul> |                   |

**Figura 20.** *Electroválvula neumática*

| Componente                                                                        |                                                                                                                                                                                     | Cantidad          |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
|  | Válvula de solenoide direccional<br>quíntuple de 2 vías                                                                                                                             | 2                 |
|                                                                                   | <b>Características</b>                                                                                                                                                              | <b>Referencia</b> |
|                                                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo: 5/2</li> <li>- Función: Controla el flujo de aire en el sistema neumático para el control de los cilindros. Adaptado [16]</li> </ul> |                   |

**Figura 21.** *Pulsador de parado de emergencia*

| Componente                                                                          |                                                                                                                                                                                           | Cantidad          |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
|  | Pulsador Obturador                                                                                                                                                                        | 1                 |
|                                                                                     | <b>Características</b>                                                                                                                                                                    | <b>Referencia</b> |
|                                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo: Momentáneo</li> <li>- Función: Para activar manualmente funciones específicas del sistema (Parada de emergencia). Adaptado [16]</li> </ul> |                   |

**Figura 22.** Módulo de salidas digitales

|                                                                                   | Componente                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Cantidad           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
|  | SIMATIC S7-1200, módulo de salidas digitales SM 1222, 16 DO, DC 24V, Transistor 0,5 A                                                                                                                                                                                                                      | 1                  |
|                                                                                   | <b>Características</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                     | <b>Referencia</b>  |
|                                                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilización: Para la conexión de sensores, finales de carrera y otros dispositivos de salida al PLC.</li> <li>- Compatible con el PLC S7-1200.</li> <li>- Variedad de configuraciones de S digitales y según los requisitos del sistema. Adaptado [15]</li> </ul> | 6ES7222-1BF32-0XB0 |

**Figura 23** Válvula estranguladora

|                                                                                    | Componente                                                                                                               | Cantidad          |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
|  | Válvula Estranguladora                                                                                                   | 2                 |
|                                                                                    | <b>Características</b>                                                                                                   | <b>Referencia</b> |
|                                                                                    | -- Función: Regula el flujo de aire para controlar la velocidad de movimiento de los cilindros neumáticos. Adaptado [16] |                   |

*Llenado isobárico:* el proceso de llenado isobárico para este proyecto se describe a continuación:

*Paso 1: presurizar la botella*

Una vez el cilindro de llenado baje en su totalidad, la botella quedará presurizada a una presión de 1 atm, es por eso que la presión de llenado debe ser mayor y se dispone de una presión de 1.3 bar.

**Figura 24.** *Botellas presionadas por el cilindro*

*Paso 2: abrir la válvula de Co2*

Una vez que se presuriza la botella, contiene Oxígeno, lo que no es favorable para la cerveza, por lo tanto, se debe sacar este oxígeno. Una vez se abra la válvula de Co2 debido a su densidad, se irá al fondo de la botella y el aire que hay dentro se ubicará en la parte superior de la botella.

*Paso 3: abrir la válvula de escape*

Cuando se abre la válvula de escape, comienza a salir el aire que se encuentra en la parte superior de la botella, esta válvula permanece abierta hasta que salga el aire en su totalidad.

*Paso 4: cerrar la válvula de escape*

Una vez salga todo el aire, se cierra la válvula de escape para que la botella quede totalmente presurizada con Co2.

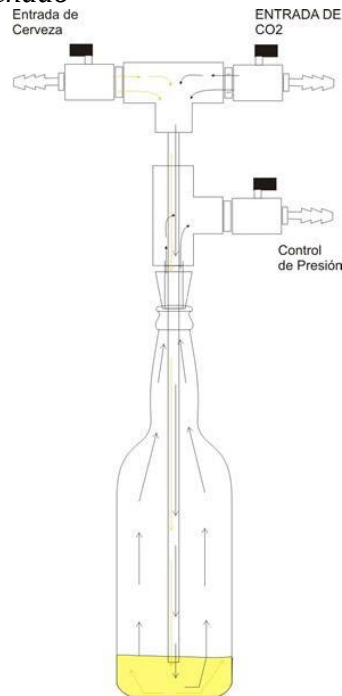
*Paso 5: abrir válvula de cerveza*

En este punto la cerveza no bajará ya que se encuentra a la misma presión de Co2 en la botella.

*Paso 6: abrir válvula de escape*

Una vez se libere la presión o se abra la válvula de escape, la cerveza comenzará a bajar de acuerdo con el porcentaje de apertura de la válvula.

**Figura 25.** Esquema proceso de llenado



Tomado [2]

*Tiempo de llenado:* se calculó el tiempo de llenado utilizando las fórmulas de Bernoulli, considerando la densidad del CO<sub>2</sub> y la cerveza, posterior se implementa en la programación.

La ecuación de Bernoulli en este caso es:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + Pgh = cte$$

Donde:

$P$  es la presión del fluido en el punto considerado.

$\rho$  es la densidad del fluido.

$v$  es la velocidad del fluido en el punto considerado.

$g$  es la aceleración debida a la gravedad.

$h$  es la altura del punto considerado con respecto a un nivel de referencia.

$$Q = A * V$$

$Q$  =caudal,

$A$  = área transversal

$V$ =velocidad del fluido

Se despeja  $V$  y se reemplaza en la fórmula de Bernoulli.

$$P + \frac{1}{2}\rho\left(\frac{Q}{A}\right)^2 + Pgh = cte$$

$$P - P_0 = 1.3 * 10^5 Pa$$

$$\rho = 1050 \frac{kg}{m^3}$$

$$A = \pi * (0.005m)^2 \cong 7.85398 * 10^{-5}m^2$$

$$Q = A * \sqrt{\frac{2(P - P_0)}{\rho}}$$

$$Q_{\frac{ml}{s}} = 483.096 \text{ ml/s}$$

La válvula que controla la salida de presión se abrirá a un 10% y debido a que la densidad del CO<sub>2</sub> y la cerveza no varían mucho, se asume que el caudal de entrada será el mismo al despresurizar o abrir la válvula de escape, por lo tanto, el caudal con el que se llenaría la botella sería de 48.3ml/s. Sabiendo esto ya podemos calcular el tiempo de llenado de la botella de la siguiente forma:

$$Tiempo = \frac{Volumen}{Caudal} = \frac{355ml}{48.4ml/s} = 7.33 \text{ segundos}$$

### *Programación*

#### *Selección de PLC*

En el ámbito de la automatización industrial, la selección del PLC adecuado es fundamental para el diseño y funcionamiento eficiente de los sistemas de control. En este contexto, el PLC S7-1200 de Siemens se ha establecido como una opción popular y confiable, además de también tener conocimientos previos prácticos sobre su configuración de hardware y software. Sin embargo, el mercado ofrece una variedad de alternativas con características y funcionalidades similares que pueden ser consideradas para diferentes aplicaciones. En esta comparativa, analizaremos el PLC S7-1200 junto con otras opciones disponibles, destacando sus características clave y proporcionando una visión general para facilitar la selección del PLC más adecuado para las necesidades específicas de automatización

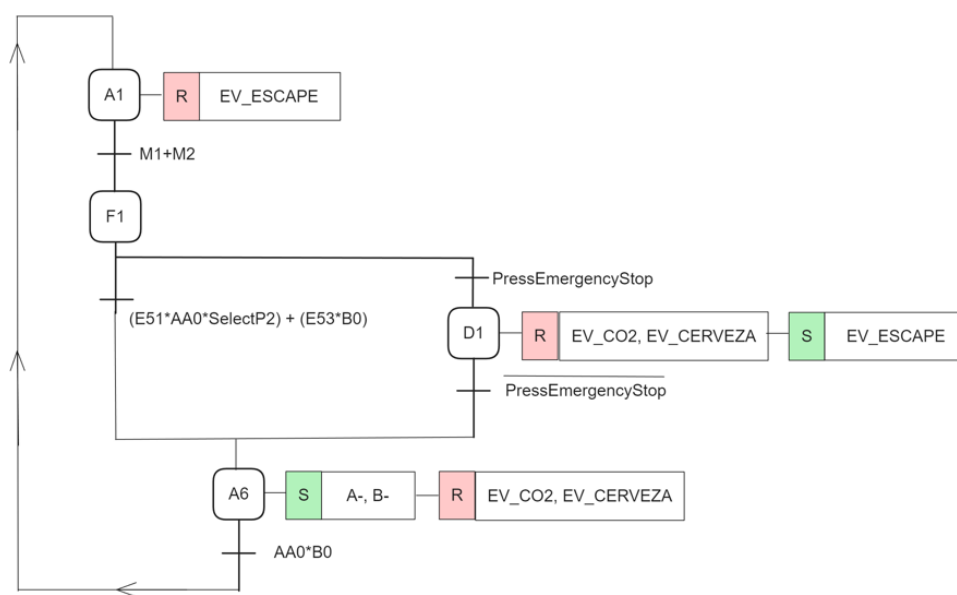
**Tabla 1.** *Comparativa de alternativas PLC*

| <b>Característica</b>     | <b>Siemens S7-1200</b>                                                                                        | <b>Allen-Bradley<br/>MicroLogix 1400</b>                                        | <b>Mitsubishi<br/>Electric FX3<br/>Series</b>                           | <b>Omron CP1E Series</b>                                          |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Entradas/<br>Salidas      | Amplia gama de E/S digitales y analógicas, adecuadas para control de llenado y tapado de botellas de cerveza. | Suficientes E/S digitales y analógicas para control de proceso.                 | Amplia gama de E/S digitales y analógicas para control de proceso.      | Suficientes E/S digitales y analógicas para control de proceso.   |
| Gama de<br>Producto       | Gama media                                                                                                    | Gama media                                                                      | Gama media                                                              | Gama media                                                        |
| Comunicación<br>Ethernet  | Sí, para integración con otros sistemas y supervisión remota.                                                 | Opcional, puede ser necesaria dependiendo de la integración con otros sistemas. | Opcional, útil para integración con sistemas de supervisión y control.  | Opcional, para integración con otros sistemas.                    |
| Capacidad de<br>expansión | Admite módulos de expansión para ampliar las E/S según sea necesario.                                         | Admite expansiones de E/S para futuras ampliaciones del sistema.                | Posibilidad de expansión de E/S para adaptarse a cambios en el proceso. | Capacidad de expansión para adaptarse a cambios en la aplicación. |

| <b>Característica</b>     | <b>Siemens S7-1200</b>                                                                                 | <b>Allen-Bradley<br/>MicroLogix 1400</b>                                                                    | <b>Mitsubishi<br/>Electric FX3<br/>Series</b>                                                            | <b>Omron CP1E Series</b>                                                                                                           |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Software de programación  | TIA Portal, intuitivo y fácil de usar, con herramientas específicas para la automatización industrial. | RSLogix, Studio 5000, software bien establecido en la industria, pero puede tener una curva de aprendizaje. | GX Works, software intuitivo con herramientas avanzadas de programación.                                 | CX-Programmer, software fácil de usar con funciones avanzadas para la automatización.                                              |
| Facilidad de programación | Intuitiva, con amplio soporte y recursos de aprendizaje disponibles.                                   | Varía según el usuario, pero ofrece una variedad de recursos de capacitación y soporte.                     | Intuitiva, con herramientas de programación amigables para el usuario.                                   | Fácil de usar, con una interfaz de programación accesible para usuarios de todos los niveles.                                      |
| Condiciones ambientales   | Diseñado para entornos industriales exigentes, resistente al polvo y a la humedad.                     | Resistente a condiciones ambientales típicas de la industria, pero puede requerir protección adicional.     | Resistente a condiciones ambientales de fábrica, requiere protección en entornos húmedos o polvorientos. | Diseñado para resistir condiciones ambientales típicas de la industria, puede necesitar protección adicional en entornos extremos. |

### *Diagrama GRAFCET*

Una vez establecido el diseño mecánico de la máquina y haber seleccionado los componentes eléctricos y neumáticos para el sistema de automatización, el siguiente paso crucial radica en la representación del flujo de trabajo de la máquina. Independientemente del PLC y software específico elegidos para la implementación, el uso de un diagrama GRAFCET se destaca como una herramienta fundamental en el diseño y la comprensión del proceso de control. En este contexto, nos enfocamos en la implementación de un diagrama GRAFCET utilizando el lenguaje ladder en el software TIA Portal V18. Esto permite una representación visual clara y detallada del proceso de control, facilitando la programación y la depuración del sistema de automatización. Se ha considerado la incorporación de un concepto adicional llamado "Gemma" en el sistema, la inclusión de este elemento puede proporcionar mejoras significativas en términos de flexibilidad.

**Figura 26. Gemma**

En la figura 13 se presenta el diagrama GRAFCET siguiendo el concepto de Gemma, donde cada estado representa una situación específica del sistema. A continuación, se describen los estados identificados.

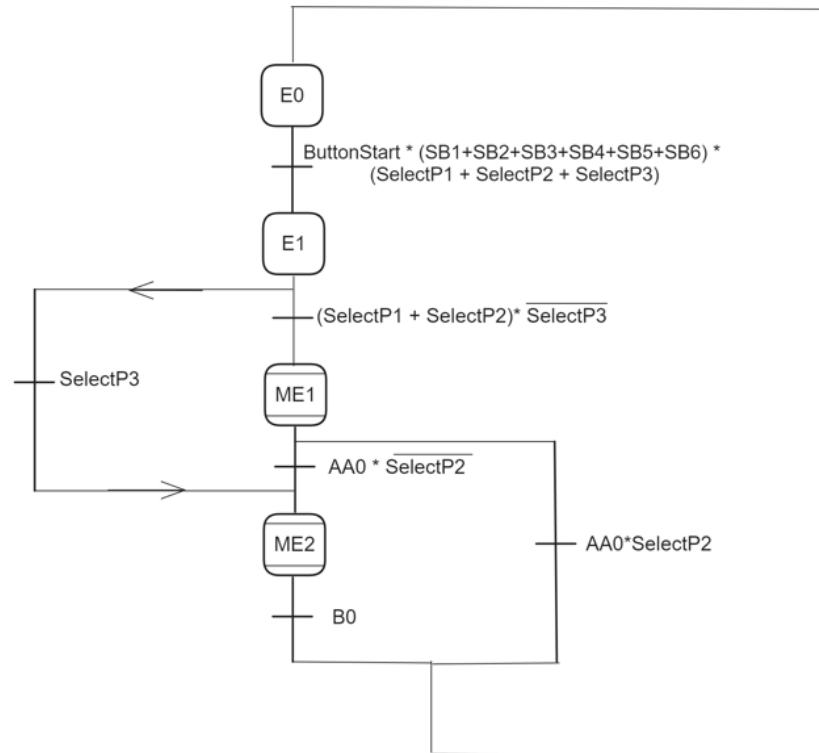
*A1: parada en el estado inicial.* En este estado, la máquina se encuentra con todos sus actuadores en posición inicial y está lista y a la espera de la condición para iniciar con la etapa de producción.

*F1: producción normal.* Es el estado en el que la máquina produce normalmente, es decir, realiza la tarea para la que ha sido concebida. Este estado no tiene por qué corresponder a un funcionamiento automático.

*A6: puesta del sistema en el estado inicial.* El sistema es llevado hasta la situación inicial (normalmente situación de reposo); una vez realizado, la máquina pasa a estar parada en el estado inicial.

*D1: parada de emergencia.* No solo contiene la simple parada de emergencia, sino también todas aquellas acciones necesarias para llevar el sistema a una situación de parada segura.

**Figura 27.** GRAFCET de todo el proceso de llenado y tapado



A la hora de diseñar el GRAFCET general para el proceso, se implementó una funcionalidad que permite al usuario elegir entre tres ciclos diferentes. El primer ciclo es el ciclo completo, en el cual la máquina realizará el proceso de llenado y tapado de una sola vez. El segundo ciclo corresponde únicamente al proceso de llenado, mientras que el tercer ciclo se enfoca exclusivamente en el proceso de tapado. Esta estructura se diseñó con el propósito de facilitar el seguimiento y mantenimiento de las diferentes etapas del proceso, así como para evitar situaciones como la mencionada, donde alguna tapa se caiga durante el proceso y genere botellas llenas, pero sin tapar. En tal caso, el operario puede fácilmente colocar la tapa faltante y reiniciar únicamente la etapa de tapado, evitando así el vaciado del contenido de la botella y la necesidad de repetir el

proceso completo. En la figura 14 se muestra el GRAFCET del proceso en general con las diferentes etapas, donde:

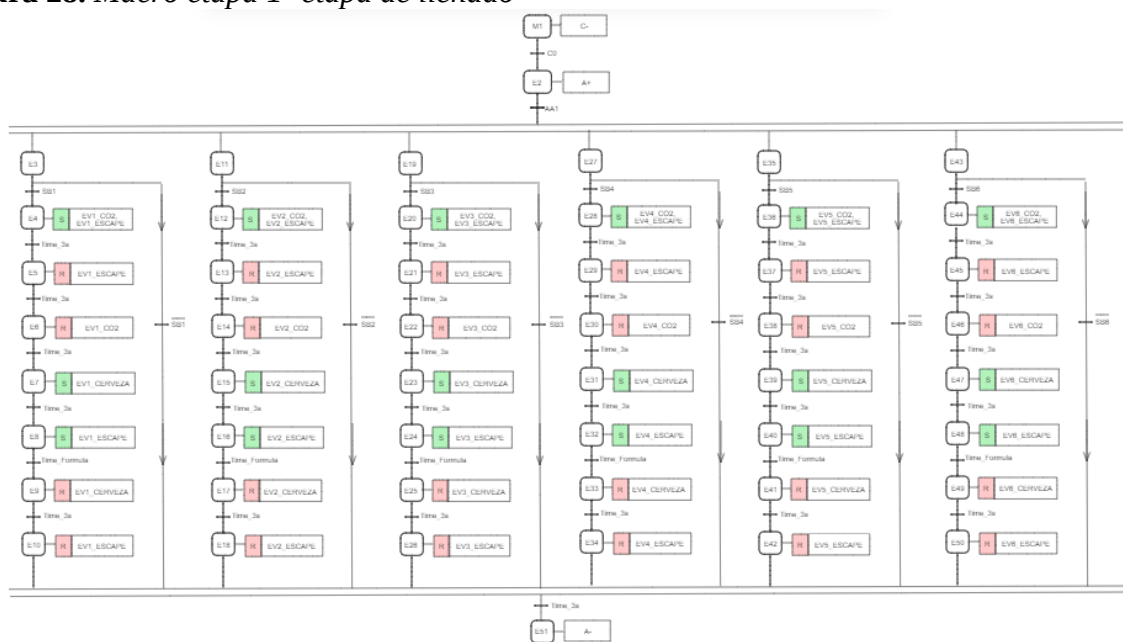
*E0= Etapa inicial.* Aquí la máquina se encuentra en condiciones iniciales y espera la condición de puesta en marcha.

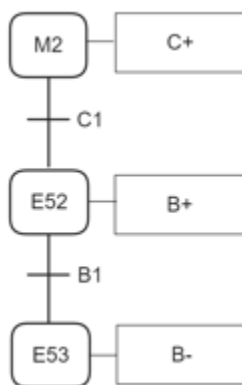
*E1=Estado 1.* Este estado representa un modo de espera, donde el flujo del programa depende del ciclo de operación elegido por el usuario.

*ME1= Macro etapa 1.* Esta macro etapa engloba todo el proceso de llenado de las botellas, teniendo en cuenta el proceso de llenado isobárico mencionado anteriormente.

*ME2= Macro etapa 2.* Esta macro etapa corresponde a la secuencia para realizar el tapado de las botellas.

**Figura 28. Macro etapa 1- etapa de llenado**

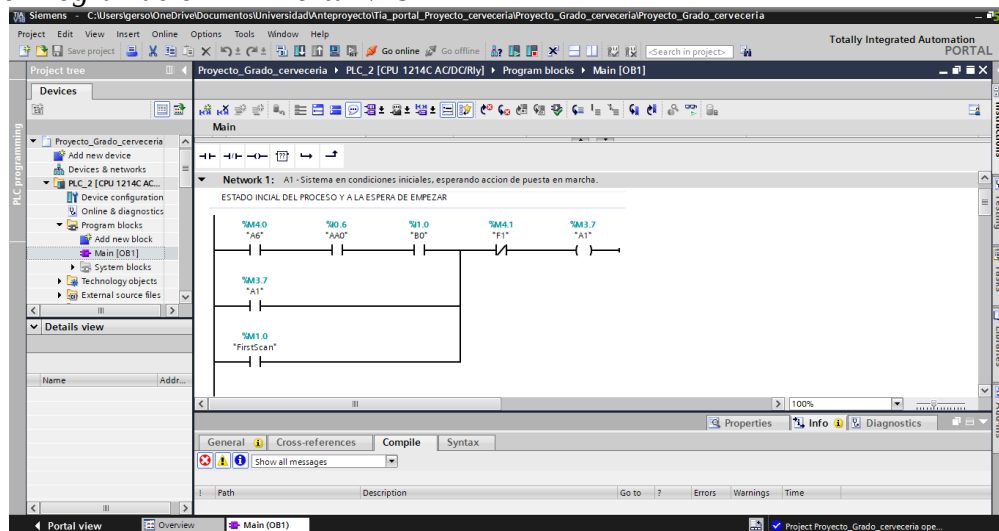


**Figura 29.** Macro etapa 2- etapa de tapado

Con el diagrama GRAFCET proporcionado, se tiene la flexibilidad de implementar la programación en cualquier lenguaje de programación compatible con el PLC Siemens S7-1200. En este caso, se utilizará el software TIA Portal V18, el cual es el entorno de desarrollo integrado (IDE) proporcionado por Siemens para la programación, configuración y diagnóstico de sus controladores lógicos programables (PLC).

El TIA Portal V18 ofrece una interfaz intuitiva y potente que permite la traducción directa del diagrama GRAFCET a lenguaje de programación ladder (lenguaje de escalera). Esta opción facilita la programación del PLC S7-1200, ya que el ladder es uno de los lenguajes de programación más comunes y ampliamente utilizados en la industria de la automatización.

Una vez implementado el diagrama GRAFCET para todo el proceso, se estima una producción de 6 botellas llenas y tapadas por minuto o 360 botellas por hora. Es importante tener en cuenta que estos tiempos son proyecciones ideales y pueden variar al momento de la implementación final, dependiendo de la configuración de velocidad que se aplique a los pistones y a los tiempos de activación de las electroválvulas. En este proyecto, se han empleado tiempos prudentes para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente del sistema.

**Figura 30** Programación TIA Portal v18

### Interfaz HMI

La interfaz de usuario se diseñó tomando como referencia la normativa ISA 101, que establece las mejores prácticas para crear interfaces hombre-máquina (HMI) efectivas y amigables. Se priorizó la creación de una interfaz intuitiva que permitiera al usuario visualizar fácilmente el progreso del proceso y monitorear el estado de los componentes clave del sistema.

En la interfaz, se incluyeron elementos visuales para mostrar la posición de los cilindros, indicar qué válvulas están activas en un momento dado y proporcionar información en tiempo real sobre la cantidad de cerveza llenada. Además, se agregaron indicadores para representar el estado general del proceso, indicando si se encuentra en condiciones iniciales, en proceso o en parada. Estos indicadores se basaron en el feedback proporcionado por el pequeño Gemma implementado en el sistema.

Una característica importante de la interfaz es la capacidad para que el usuario seleccione entre los tres tipos de ciclo mencionados en el GRAFCET del proceso: el ciclo completo, solo el

proceso de llenado y solo el proceso de tapado. Esto brinda al usuario un mayor control sobre el funcionamiento del sistema y la flexibilidad para adaptarse a diferentes escenarios de producción.

La interfaz de usuario se diseñó con un enfoque centrado en el usuario, cumpliendo con las directrices de la normativa ISA 101 y proporcionando una experiencia de usuario intuitiva y eficiente para monitorear y controlar el proceso de llenado y tapado de botellas de cerveza.

**Figura 31.** *Interfaz HMI*

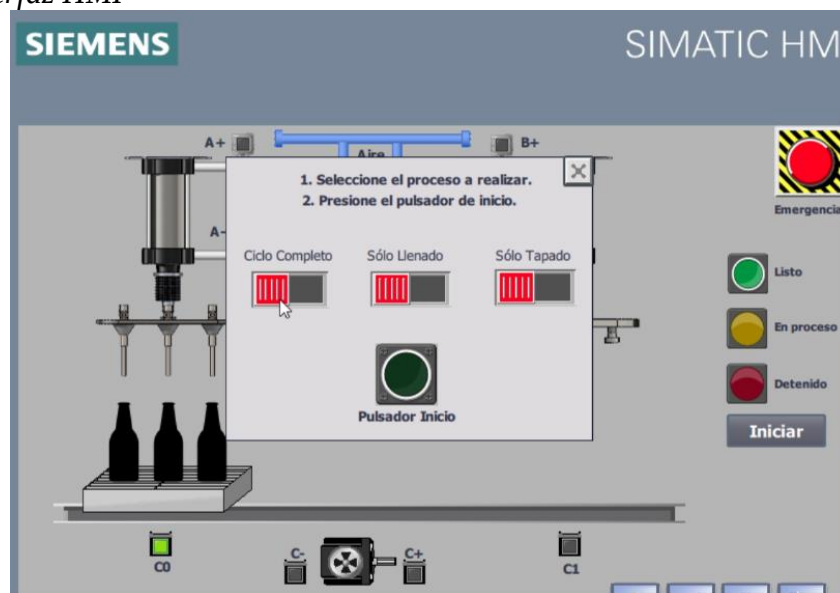


Figura 32. HMI-vista Válvulas

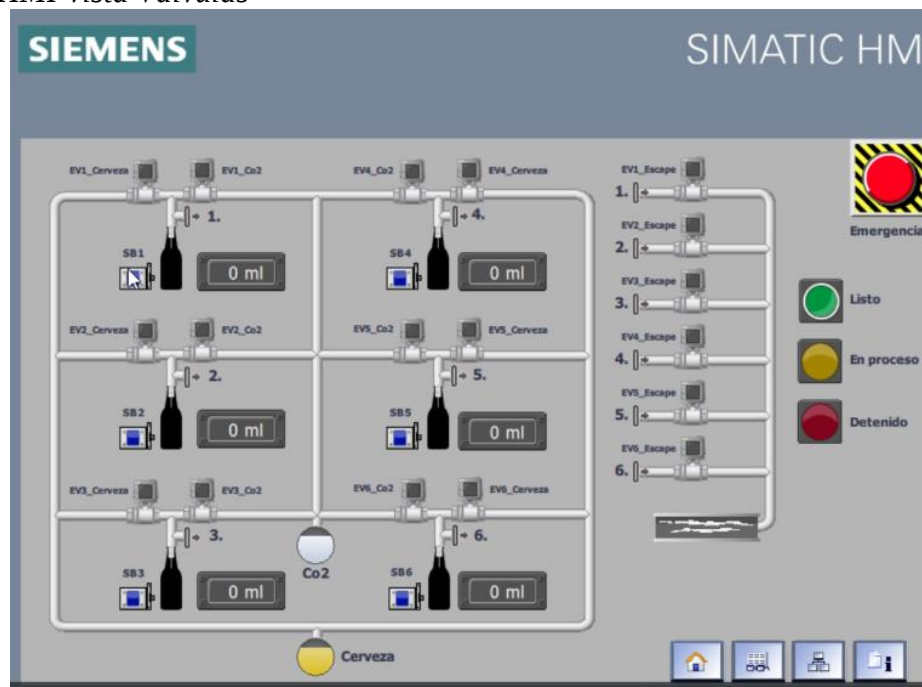
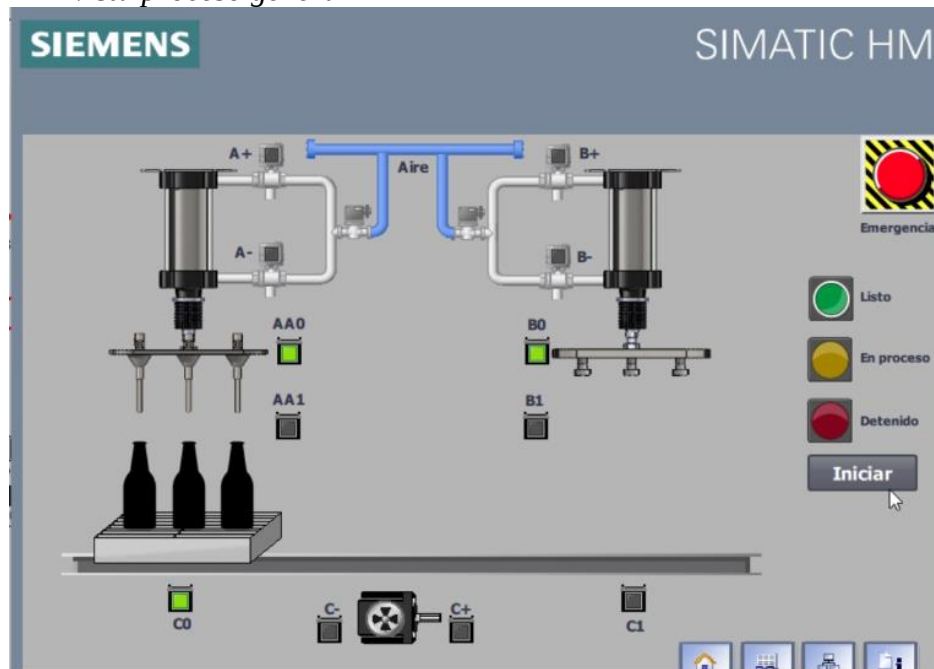


Figura 33. HMI-vista proceso general



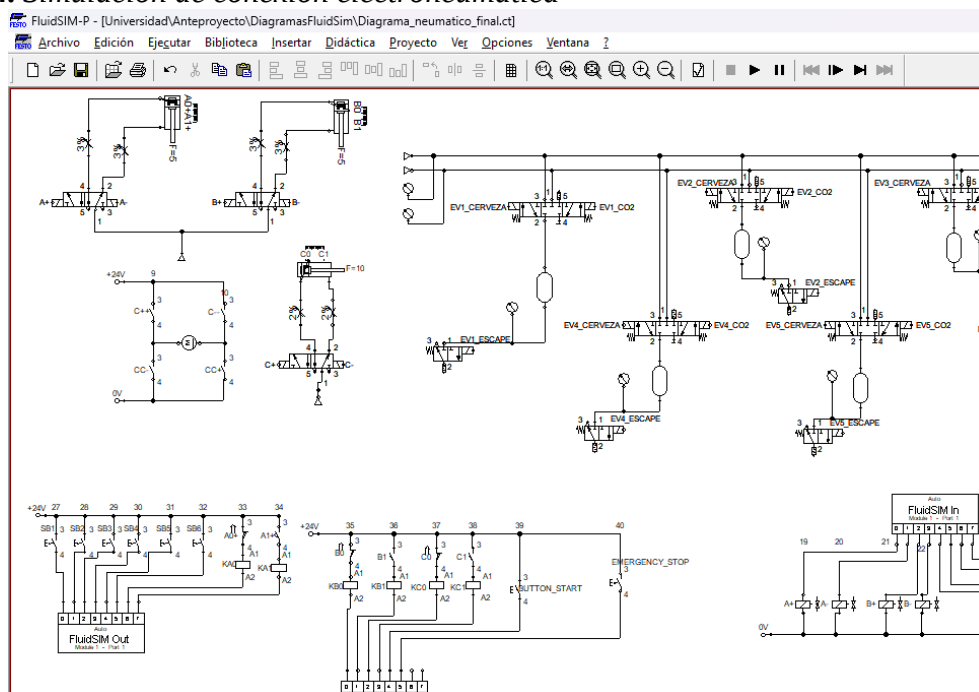
### Simulación

Para abordar el tema de las simulaciones y la comunicación entre los diferentes componentes del sistema, así como la programación del PLC y el HMI, se implementaron las siguientes estrategias:

#### Sistema electroneumático

Se utilizó el software FluidSIM para diseñar y simular el circuito electroneumático del sistema. En este software se configuraron y conectaron todos los componentes del sistema, incluyendo cilindros, electroválvulas, pulsadores y sensores. Además, se llevó a cabo la simulación de los diferentes escenarios de funcionamiento del sistema para verificar su comportamiento y rendimiento en condiciones virtuales.

**Figura 34.** Simulación de conexión electroneumática



### *Simulación PLC*

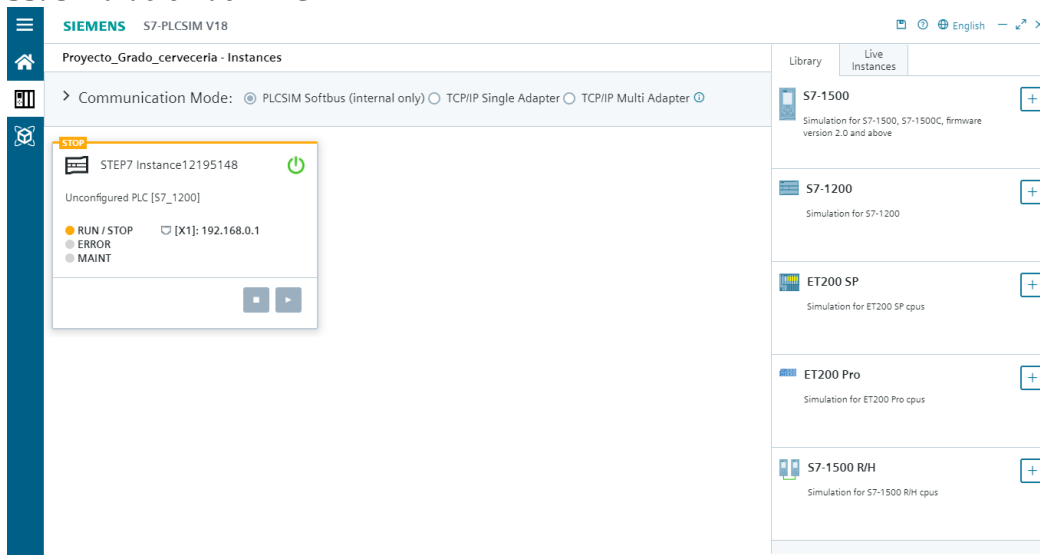
Para la simulación del PLC, se utilizó el software integrado en TIA Portal llamado PLCSIM. Este software permite crear un PLC virtual con una dirección IP asignada, lo que facilita la simulación del comportamiento del PLC en un entorno virtual antes de su implementación física.

Mediante PLCSIM, se desarrolló y probó el programa de control del PLC en un entorno virtual, lo que permitió verificar su funcionamiento y realizar ajustes necesarios sin la necesidad de conectar hardware físico. Esta simulación proporcionó una representación fiel del comportamiento del PLC y su interacción con los diferentes componentes del sistema.

Además, PLCSIM ofrece herramientas para monitorear y depurar el programa de control, lo que facilitó la identificación y corrección de posibles errores de programación. Esto contribuyó a garantizar la fiabilidad y eficacia del sistema de automatización.

La utilización de PLCSIM como herramienta de simulación en TIA Portal permitió una integración fluida entre el diseño del programa de control y la configuración del hardware, lo que resultó en una implementación más eficiente y precisa del sistema de automatización.

**Figura 35. Simulación del PLC**



### *Conexión vía OPC*

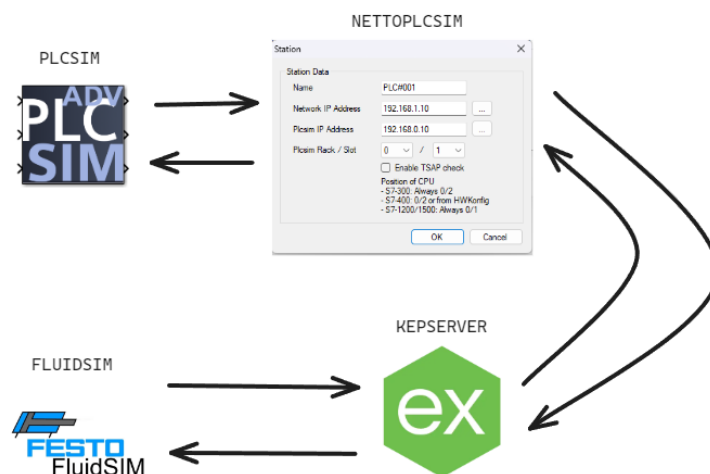
Una vez completada la simulación del PLC en PLCSIM y el diseño del circuito electro neumático en FluidSIM, se procedió a establecer la conexión entre ambos entornos para verificar el funcionamiento del sistema desde el HMI. Para ello, se emplearon dos programas adicionales: NetToPLCSim y KepServer.

NetToPLCSim se utilizó para crear una IP de red local y establecer una conexión con el PLC virtual creado en PLCSIM. Esta herramienta permitió que el PLC virtual en TIA Portal se comunicara con el entorno de simulación en FluidSIM, facilitando la transmisión de datos entre ambos sistemas.

Por otro lado, se empleó KepServer para enviar datos desde el PLC virtual hacia FluidSIM. KepServer actuó como un servidor OPC (OLE for Process Control), permitiendo la comunicación entre diferentes dispositivos y sistemas de automatización industrial. Se configuró para que se conectara a la red creada por NetToPLCSim y enviara los datos del PLC virtual hacia FluidSIM.

En FluidSIM, se habilitó la opción de modo OPC para recibir los datos provenientes del PLC a través de KepServer. Se configuraron los diferentes módulos para las entradas y salidas definidas en KepServer, lo que permitió que FluidSIM interpretara y respondiera a las señales enviadas desde el PLC virtual en tiempo real.

Esta configuración de conexión entre FluidSIM, TIA Portal y los programas adicionales NetToPLCSim y KepServer posibilitó la verificación y validación del funcionamiento del sistema desde el HMI, proporcionando una representación precisa y fiable de la interacción entre los diferentes componentes del sistema de automatización.

**Figura 36.** Esquema de conexión del PLC Y FluidSIM

Una vez completada la conexión entre los distintos componentes del sistema, se llevó a cabo una verificación del funcionamiento global del sistema. Esto incluyó la validación de la programación del PLC, así como la correcta respuesta y ejecución de todas las funciones del sistema electroneumático.

Durante esta fase de verificación, se realizaron pruebas para confirmar que todas las secuencias de control programadas se ejecutaban según lo previsto. Se verificó el correcto funcionamiento de los cilindros neumáticos, las electroválvulas, los sensores y todos los componentes del sistema. Se evaluaron diferentes escenarios y condiciones para garantizar la fiabilidad y la estabilidad del sistema en diferentes situaciones operativas.

Además, se verificó la comunicación entre el PLC, el HMI y el software de simulación, asegurando que los datos se transmitieran correctamente entre los diferentes entornos y que el HMI reflejara con precisión el estado y el comportamiento del sistema en tiempo real.

### 3.8 Descripción de etapas y tareas

Este apartado detalla las etapas y tareas clave en el proyecto de automatización para el llenado y tapado de botellas de cerveza artesanal mediante simulación. Estas etapas y tareas están organizadas de acuerdo con el programa de trabajo del proyecto, contribuyendo a la solución del problema definido y al logro de los objetivos establecidos.

#### *Etapas 1: preparación inicial*

*Tarea 1.1. - Definición de objetivos:* en esta etapa inicial, se definen claramente los objetivos específicos del proyecto. Esto proporciona una base sólida para la planificación y ejecución del proyecto.

*Tarea 1.2. - Revisión bibliográfica:* en esta tarea, se llevará a cabo una revisión minuciosa de la literatura científica y técnica relacionada con la automatización específica en la industria cervecera, así como con los procesos de llenado y tapado de botellas. Además, se explorarán las últimas tendencias y mejores prácticas en la programación de PLC aplicada a sistemas mecatrónicos. Esta revisión bibliográfica en profundidad servirá como fundamento esencial para la toma de decisiones informadas con relación al diseño.

#### *Etapas 2: diseño del sistema.*

*Tarea 2.1. - Selección de componentes:* se seleccionaron componentes, como sensores y actuadores, necesarios para el sistema automatizado. Estas selecciones se basan en la revisión bibliográfica y los objetivos específicos del proyecto.

*Tarea 2.2. - Diseño de sistema mecatrónico:* se llevó a cabo el diseño detallado del sistema mecatrónico, como sistema de llenado de botellas, sistema de tapado de botellas y sistema neumático. Esto incluye la especificación de dimensiones y características.

#### *Etapas 3: simulación y programación de PLC*

*Tarea 3.1. - Creación de modelos:* se utilizaron herramientas de software de simulación mecatrónica para crear modelos virtuales del sistema completo, incluyendo componentes mecánicos, eléctricos y de control.

*Tarea 3.2. - Programación de PLC:* se utilizó un entorno virtual de programación de PLC para desarrollar y cargar el código del PLC que controlará el sistema automatizado simulado. Se implementan lógicas de control, temporizadores y secuencias de operación.

#### *Etapas 4: pruebas y validación*

*Tarea 4.1. - Pruebas virtuales de funcionamiento:* se realizaron pruebas virtuales para validar el funcionamiento del sistema automatizado simulado. Se simularon diferentes escenarios de producción y se evaluaron variables clave.

#### *Etapas 5: análisis de datos y documentación*

*Tarea 5.1. - Análisis de datos:* los datos generados durante las pruebas se analizaron utilizando el entorno de simulación. Se evaluaron el desempeño del sistema y la eficacia de la programación aplicada al PLC.

*Tarea 5.2. - Documentación de resultados:* se generaron informes técnicos y gráficos que presentan los resultados de las simulaciones y pruebas virtuales. Estos informes destacan los hallazgos clave y las conclusiones.

Cada etapa y tarea fue diseñada para contribuir al logro de los objetivos específicos del proyecto, que incluye la automatización del proceso de llenado y tapado de botellas de cerveza artesanal a través de la simulación.

### **3.9 Conclusión del capítulo**

Para concluir este capítulo de diseño, es evidente que, gracias a una exhaustiva investigación y desglose de los objetivos, se ha abordado cada faceta del problema de manera efectiva. Esto ha llevado a la formulación de soluciones altamente viables, permitiendo una implementación fluida. Aunque no se puede garantizar un desarrollo exacto en todos los aspectos, se han identificado alternativas que cumplen con los objetivos establecidos y generan un nivel de satisfacción adecuado.

Al aplicar los conocimientos obtenidos de la investigación y los estudios pertinentes, hemos logrado implementar estos saberes de manera efectiva, contribuyendo tanto al avance en el campo de la ingeniería como al beneficio de la comunidad implicada. Este enfoque nos ha permitido convertir el diseño en acción, demostrando el potencial transformador de la teoría en la práctica para resolver problemas y mejorar nuestro entorno.

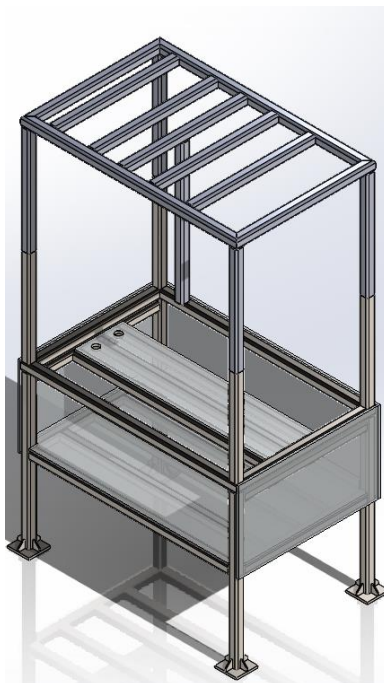
## **4. Desarrollo**

### **4.1. Diseño**

En conformidad con los criterios previamente establecidos en el capítulo anterior, se procedió al diseño del armazón o estructura que sostendría toda la máquina de llenado y tapado utilizando el software SolidWorks. Para este propósito, se optó por utilizar tubos de acero con perfil cuadrado de dimensiones 40X40X1,5 fabricados en acero inoxidable 304. Estas elecciones se realizaron considerando su resistencia y durabilidad, así como su idoneidad para el diseño propuesto.

Teniendo en cuenta las medidas especificadas anteriormente, se desarrolló el modelo correspondiente del armazón.

**Figura 37.** *Armazón individual*

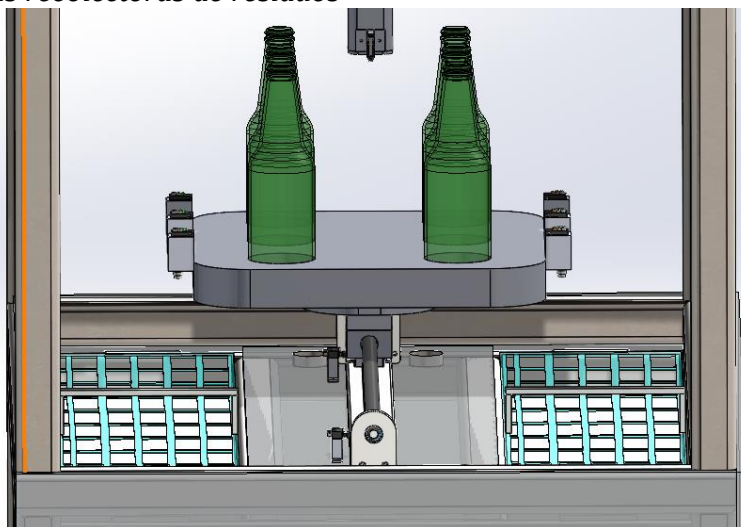


El armazón diseñado incluye un compartimiento destinado al almacenamiento de insumos o piezas de repuesto de la máquina. En su parte central, cuenta con una plataforma que tiene la función de soportar el mecanismo encargado de mover el conjunto de seis botellas desde la zona de llenado hasta la zona de tapado.

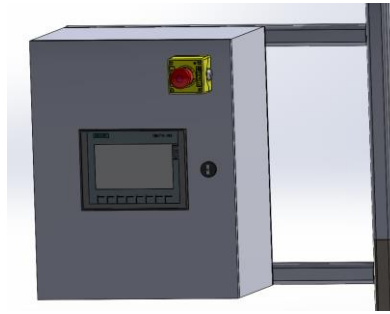
El compartimiento de almacenamiento está recubierto con placas de acero inoxidable de 2 mm de espesor, al igual que la plataforma central. Las dimensiones de ambos componentes se ajustan según el área que necesite ser cubierta. Además, la plataforma central está equipada con dos agujeros que permiten el paso de cableado, facilitando así el mantenimiento del orden en el modelo.

A los laterales de la plataforma central se encuentran dos espacios diseñados para alojar canastas destinadas a almacenar residuos sólidos y líquidos en caso de destrucción de una botella. Estas canastas están equipadas con una malla para atrapar los residuos más grandes y un fondo que retiene el líquido, garantizando así un manejo adecuado de los desechos.

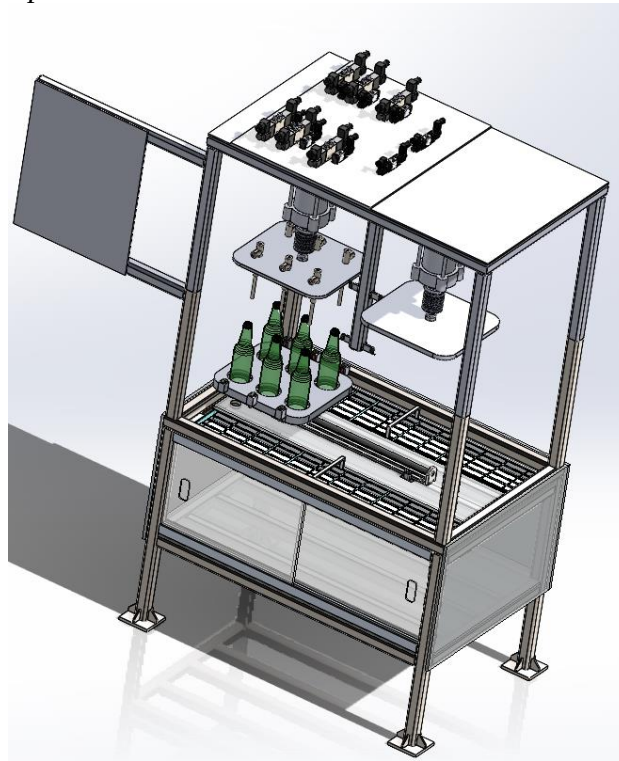
**Figura 38.** *Canastas recolectoras de residuos*



Adyacente al ensamblaje principal, se ubica un tablero eléctrico de dimensiones 40X50, donde se concentra toda la parte eléctrica y de control necesaria para el funcionamiento del sistema. Este ensamblaje está soldado en la parte frontal izquierda del armazón principal, garantizando así una disposición ordenada y eficiente de los componentes eléctricos y de control, y facilitando su acceso para el mantenimiento y la operación del sistema.

**Figura 39.** *Tablero eléctrico y de control*

El diseño del almacén previamente presentado tiene un prototipo similar, como se puede observar en la siguiente imagen. Este prototipo incluía la idea de utilizar electroválvulas neumáticas en la parte superior. Sin embargo, más tarde en la investigación se descubrió que este tipo de electroválvulas no son adecuadas para el transporte de líquidos, por lo que este modelo fue descartado. Además, este prototipo tenía una altura más baja, lo que resultaba poco ergonómico para el tipo de trabajo requerido. Por esta razón, el modelo actual se ha diseñado con una mayor altura para mejorar la ergonomía y la eficiencia en el proceso de trabajo.

**Figura 40.** *Primer prototipo*

Para garantizar la funcionalidad del diseño y prevenir posibles desgastes prematuros de piezas o fallos, se han planteado los siguientes cálculos en cuanto a resistencia de materiales en vigas y columnas. Estos cálculos se realizan con el fin de verificar que el armazón diseñado cuente con una lógica matemática correcta y sea capaz de soportar las cargas esperadas.

Con el propósito de llevar a cabo una modelación matemática del sistema y verificar la capacidad de la estructura para satisfacer las necesidades requeridas, se presentan las siguientes ecuaciones. Estas ecuaciones proporcionarán una base sólida para evaluar la resistencia y la estabilidad del armazón, asegurando así su adecuación para el uso previsto.

## 4.2. Simulaciones matemáticas

### *Sistema de vigas*

Para determinar si los tubos metálicos de acero inoxidable 304 son capaces de soportar el peso del subsistema conformado por el cilindro neumático, la base metálica y el conjunto de boquillas de llenado, se aplican las ecuaciones de vigas con empotramiento perfecto. En este análisis, se considera que las vigas tienen un empotramiento doble y que la carga se encuentra en la mitad de la viga. Posteriormente, se calcula el cortante máximo para evaluar la capacidad de los tubos para soportar la carga aplicada. Este proceso permite asegurar la integridad estructural del sistema y su capacidad para cumplir con los requisitos de diseño y funcionamiento.[12]

$$M_A = \frac{PL}{8} = \frac{(60)(0.566)}{8} = 4.24 \text{ Nm}$$

$$M_B = \frac{PL}{8} = \frac{(60)(0.566)}{8} = 4.24 \text{ Nm}$$

$$R_{Ay} = \frac{p}{2} = \frac{60}{2} = 30 \text{ N}$$

$$R_{By} = \frac{p}{2} = \frac{60}{2} = 30 \text{ N}$$

$$Q = 1.155 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\tau = \frac{VQ}{It} = \frac{(60)(1.155 \times 10^{-6})}{(5.715 \times 10^{-8})(0.0015)} = 0.808 \text{ Mpa}$$

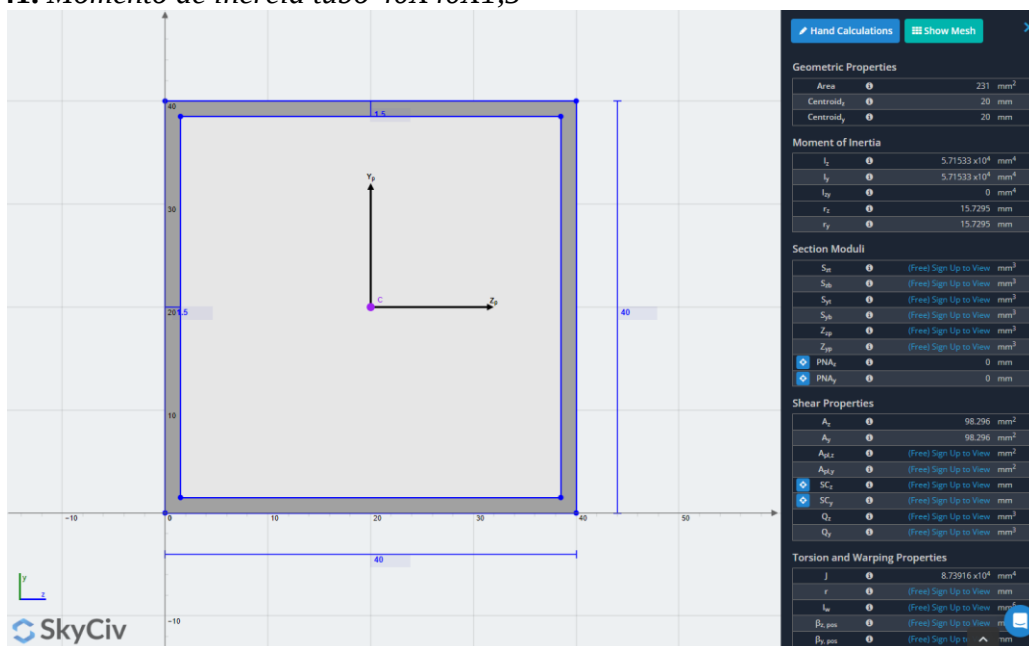
Para garantizar la integridad del sistema y prevenir cualquier daño, se ha decidido aplicar una carga de 120 N, lo que equivale aproximadamente a la mitad del peso total que el sistema debe soportar. Esta decisión se tomó considerando que toda la carga se distribuye sobre dos vigas de acero. Aunque el peso total que debe soportar el sistema es de alrededor de 60 N, se optó por mantener una carga superior para asegurar la robustez y la seguridad estructural.[13]

Dado que los tubos de acero utilizados tienen una capacidad de resistencia de hasta 490 MPa, podemos afirmar con confianza que el subsistema de llenado será adecuadamente soportado por las vigas. En cuanto al subsistema de tapado, la carga soportada es aún menor que la del mecanismo de llenado, lo que sugiere que los dos tubos de acero serán más que suficientes para soportar este subsistema. Con estos cálculos y consideraciones, se puede estar seguro de la capacidad del armazón para cumplir con los requisitos de carga y resistencia necesarios para su correcto funcionamiento.[13]

### *Sistema de columnas*

Con la asistencia de una herramienta informática, se pudo calcular los momentos de inercia, las áreas y otros datos relevantes. Estos datos resultarán útiles a lo largo del diseño mecánico del proyecto. Aunque no se utilicen directamente en el diseño mecánico, estos cálculos pueden ser útiles para análisis posteriores o para futuros proyectos relacionados con la ingeniería.[13]

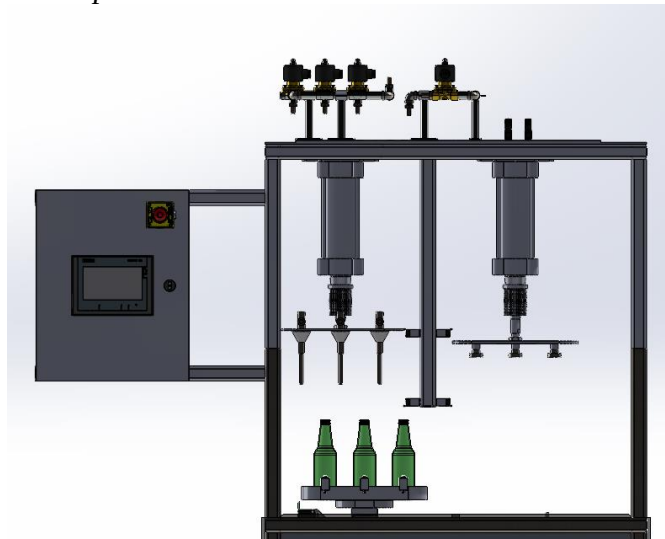
**Figura 41.** Momento de inercia tubo 40X40X1,5



Con el objetivo de determinar si el armazón será capaz de soportar el peso de todos los subsistemas que serán ensamblados sobre él, se plantea el cálculo de las cargas máximas que puede soportar una columna antes de pandearse. Para este análisis, se divide el armazón en dos secciones: la parte superior se analizará como columnas con extremos fijos, mientras que la parte inferior se tratará como un extremo fijo y el otro extremo libre. Este enfoque permitirá evaluar la capacidad de carga del armazón en diferentes condiciones de carga y determinar si es necesario realizar ajustes o reforzar alguna parte del diseño para garantizar su integridad estructural.[13]

*Análisis de la parte superior del armazón (Extremos fijos)*

**Figura 42.** Armazón parte superior



*Radio de giro mínimo*

I = Momento de inercia

A = Área

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{5.71 \times 10^4 \text{ mm}^4}{231 \text{ mm}^2}} = 15.73 \text{ mm}$$

*Relación de Esbeltez*

$$SR = \frac{KL}{r} = \frac{Le}{r} = \frac{(0.65)(950 \text{ mm})}{(15.73 \text{ mm})} = 39,25$$

*Relación de esbeltez de transición*

*Propiedades mecánicas del Acero 304*

$$Sy = 235 \text{ Mpa} = \text{Esfuerzo de cedencia}$$

$$E = 200 \text{ Gpa} = \text{Modulo de elasticidad}$$

$$Cc = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{Sy}} = \sqrt{\frac{2\pi^2 * 200 \times 10^9}{235 \times 10^6}} = 129.61$$

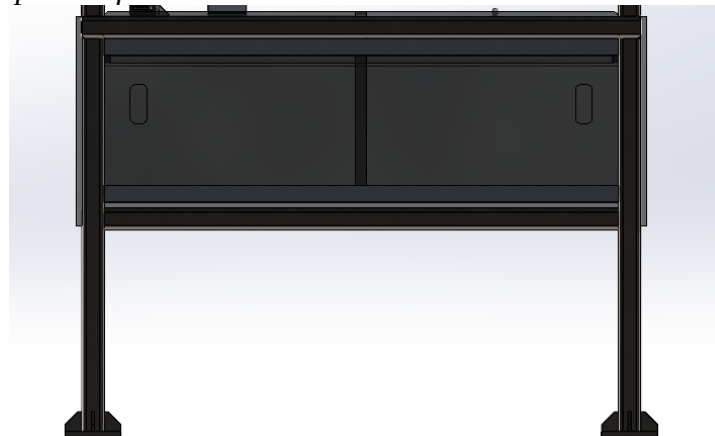
*Si  $SR < Cc$  La Columna se considera corta y se trabaja con la fórmula de J.B Johnson.*

*$P_{cr}$  = Carga Critica*

$$P_{cr} = A * Sy \left[ 1 - \frac{(Sy)(SR)^2}{4\pi^2 E} \right]$$

$$P_{cr} = 231 \times 10^{-6} * 235 \times 10^6 \left[ 1 - \frac{(235 \times 10^6)(39.27)^2}{4\pi^2 * 200 \times 10^9} \right] = 51793.39 \text{ N} = 5281.45 \text{ Kgf}$$

*Análisis de la parte inferior del armazón (Extremo fijo y libre)*

**Figura 43.** Armazón parte inferior

*Radio de giro mínimo*

$I$  = Momento de inercia

$A$  = Área

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{5.71 \times 10^4 \text{ mm}^4}{231 \text{ mm}^2}} = 15.73 \text{ mm}$$

*Relación de Esbeltez*

$$SR = \frac{KL}{r} = \frac{Le}{r} = \frac{(2)(753 \text{ mm})}{(15.73 \text{ mm})} = 95.74$$

*Relación de esbeltez de transición*

*Propiedades mecánicas del Acero 304*

$S_y = 235 \text{ Mpa}$  = Esfuerzo de cedencia

$E = 200 \text{ Gpa}$  = Modulo de elasticidad

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{S_y}} = \sqrt{\frac{2\pi^2 * 200 \times 10^9}{235 \times 10^6}} = 129.61$$

*Si  $SR < C_c$  La Columna se considera corta y se trabaja con la fórmula de J. B Johnson.*

*$P_{cr}$  = Carga Critica*

$$P_{cr} = A * S_y \left[ 1 - \frac{(S_y)(SR)^2}{4\pi^2 E} \right]$$

$$P_{cr} = 231 \times 10^{-6} * 235 \times 10^6 \left[ 1 - \frac{(235 \times 10^6)(95.74)^2}{4\pi^2 * 200 \times 10^9} \right] = 39475.35 \text{ N} = 4025.36 \text{ Kgf}$$

Continuando con los requerimientos del proyecto, se plantearon diversas alternativas para abordar el problema de trasladar las botellas desde la zona de llenado hasta la zona de tapado. Después de un proceso de investigación y evaluación, se descartaron varias propuestas que no cumplían con los requisitos necesarios para el funcionamiento deseado. Finalmente, se optó por utilizar un sistema de raíles lineales, el cual ofrece numerosas ventajas al combinar varias tecnologías en una sola plataforma de movimiento lineal integrada.[13]

Este sistema proporciona una excelente capacidad de carga y está diseñado para manejar tanto cargas normales como cargas de momento. Para satisfacer las necesidades específicas del modelo, que implica una distancia considerable que la plataforma debe recorrer desde la zona de llenado hasta la de tapado, se decidió utilizar el modelo BGS08 High Load Ball Guide. Este modelo cuenta con una longitud de carrera adecuada y es capaz de soportar una carga horizontal de hasta

1000 N, lo que es suficiente para sostener el conjunto de las botellas y sus bases correspondientes.[13]

El sistema de raíles lineales ofrece una gran versatilidad, ya que está disponible en varios modelos con diferentes longitudes de recorrido. Para este caso, se necesitaba un recorrido de al menos 46 cm, y este sistema cumplió con estas expectativas. La imagen adjunta detalla el sistema utilizado, y en los anexos se incluye un enlace a la página de la empresa encargada de su venta y distribución, proporcionando así información adicional sobre el producto.[13]

**Figura 44.** *BGS08 High Load Ball Guide*



Tomado [27]

También se consideró la posibilidad de desarrollar un propio sistema de raíles lineales, sin embargo, como fase concluyente pero igualmente significativa, y teniendo en cuenta que se utiliza un tornillo de potencia de bolas, se procedió a aplicar la ecuación del torque necesario para verificar que el motor contara con la potencia adecuada para superar la inercia del sistema.[13]

Para calcular el torque necesario, se utilizó la ecuación de eficiencia de un tornillo de bolas. Se sabe que la eficiencia de un tornillo de bolas es del 90%. Con este dato, podemos despejar el

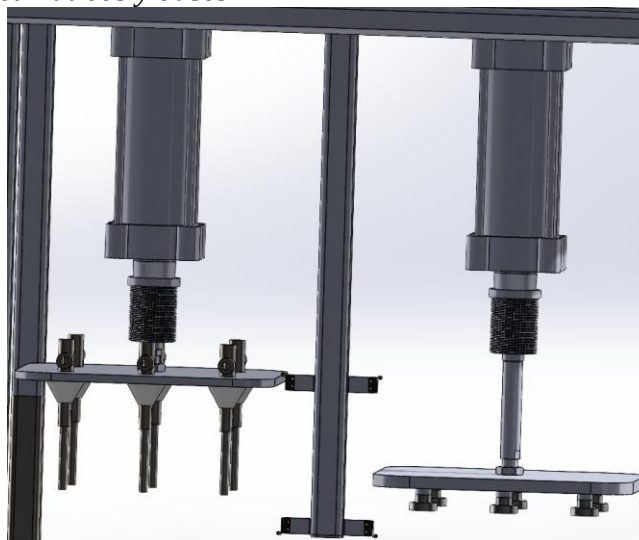
torque necesario para asegurar que el motor tenga la capacidad suficiente para vencer la inercia del sistema y así garantizar un funcionamiento óptimo y eficiente del sistema de raíles lineales.[13]

$$e = FL/2\pi Tu \rightarrow Tu = FL/2\pi e = ((60)(0.460))/((2\pi * 0.90)) = 4.8807 Nm$$

### *Llenado y tapado de botellas*

En la parte del sistema de llenado y tapado, se ha decidido emplear dos cilindros neumáticos para mover dos plataformas individuales. En la primera plataforma, que está sujeta a la punta roscada del pistón, se utilizaron dos pistones de acero inoxidable con un recorrido de 200 mm y un diámetro interno de 32 mm para ambos mecanismos.

La primera plataforma alojará las boquillas encargadas de presurizar y llenar las botellas con cerveza. Estas boquillas cuentan con un sistema de tuercas y roscas que facilitan su ensamblaje a la plataforma. Para la construcción de la plataforma, se ha seleccionado una lámina de acero inoxidable con un espesor de 5 milímetros. Este espesor proporciona robustez a la pieza y le permite soportar las cargas aplicadas. Además, el espesor ayuda a garantizar el contacto adecuado con los finales de carrera ubicados en el armazón, lo que permite conocer la posición del pistón en todo momento.

**Figura 45.** *Cilindros neumáticos y bases*

Para la plataforma de tapado, se ha diseñado una pieza de acero inoxidable que cuenta con copas para albergar las tapas tipo corona, las cuales tienen aproximadamente 30 mm de diámetro. Estas tapas se sujetan mediante imanes dentro de las copas, lo que permite que, al descender el pistón, las tapas sellen herméticamente la botella. El funcionamiento detallado y la presión utilizada en los pistones se explicó en el capítulo anterior.

Para llevar a cabo un análisis de resistencia de materiales, se ha establecido una presión de 2 bares como referencia. Esta presión se utilizará para calcular los valores necesarios y evaluar la capacidad de la plataforma para soportar la fuerza generada por los pistones a esta presión máxima.

Con el propósito de simular matemáticamente el impacto de esta fuerza sobre la plataforma que alberga las boquillas de llenado de cerveza, se ha formulado un nuevo sistema de vigas con empotramiento perfecto. Este análisis proporcionará resultados importantes que ayudarán a asegurar la resistencia y la estabilidad de la plataforma bajo las condiciones de carga especificadas.

[12]

$$P = \frac{F}{A} \rightarrow 2 \text{ bar} = \frac{F}{805 \text{ mm}^2} \rightarrow F = (805 \times 10^{-6})(200000) = 161 \text{ N}$$

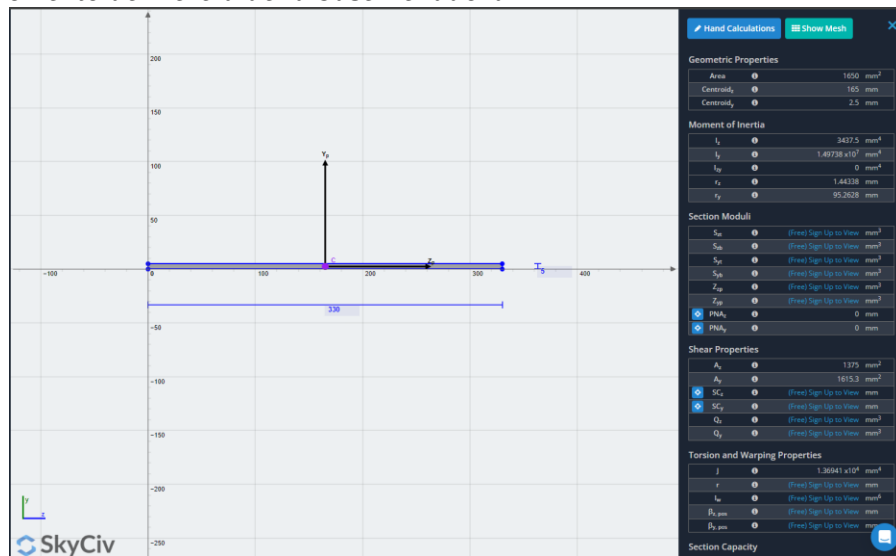
$$M_A = \frac{PL}{8} = \frac{(161)(0.315)}{8} = 6.34 \text{ Nm}$$

$$M_B = \frac{PL}{8} = \frac{(161)(0.315)}{8} = 6.34 \text{ Nm}$$

$$R_{Ay} = \frac{p}{2} = \frac{161}{2} = 80.5 \text{ N}$$

$$R_{By} = \frac{p}{2} = \frac{161}{2} = 80.5 \text{ N}$$

**Figura 46.** Momento de inercia de la base llenadora



$$\tau = \frac{VQ}{It} = \frac{(161)(1.089 \times 10^{-3})}{(1.4974 \times 10^{-5})(0.330)} = 35481.501 \text{ Pascuales}$$

Continuando con los requerimientos del proyecto, se llevará a cabo un análisis del sistema de soporte para las botellas. Se ha diseñado una pieza que sostiene las 6 botellas en su posición, asegurando que no se inclinen ni se derrame el producto al moverlas de una zona a otra. Además,

esta pieza cuenta con soportes laterales donde se colocan sensores de presencia tipo réflex para verificar la presencia de botellas en la base, evitando así desperdiciar producto en la zona de llenado.[12]

Para la fabricación de esta base, se utilizará acero inoxidable 304, dado que comparte similitud con las plataformas que bajan para llenar y tapar las botellas. Esto nos permite extrapolar que la base de soporte de las botellas podrá soportar fácilmente las cargas a las que será sometida.

Para verificar los pesos de las bases de llenado y tapado, junto con la base que lleva las botellas, se plantean las siguientes ecuaciones para determinar sus pesos aproximados. Estos datos serán fundamentales para garantizar la estabilidad y el correcto funcionamiento del sistema de soporte de botellas en el proyecto.[12]

$\delta = \text{Densidad del Acero 304}$

$W = \text{Peso (N)}$

$m = \text{masa (g)}$

$G = \text{Gravedad } (\frac{m}{s^2})$

$\delta = 7,93 \frac{g}{cm^3}$

$v_1 = \text{Volumen de la placa de llenado}$

$v_1 = 498.024 \text{ cm}^3$

$\delta = \frac{m}{v}$

$m = \delta * v$

$m = 7.93 * 498.024 = 3949.33 \text{ g}$

$W = m * G$

$W = 3.949 * 9.8 = 38.7 \text{ N}$

$v_2 = \text{Volumen de la placa de Tapado}$

$$v_2 = 739.68 \text{ cm}^3$$

$$\delta = \frac{m}{v}$$

$$m = \delta * v$$

$$m = 7.93 * 739.68 = 5865.66 \text{ g}$$

$$W = m * G$$

$$W = 5.866 * 9.8 = 57.486 \text{ N}$$

$v_3 = \text{Volumen de la base de botellas}$

$$v_3 = 3478.21 \text{ cm}^3$$

$$\delta = \frac{m}{v}$$

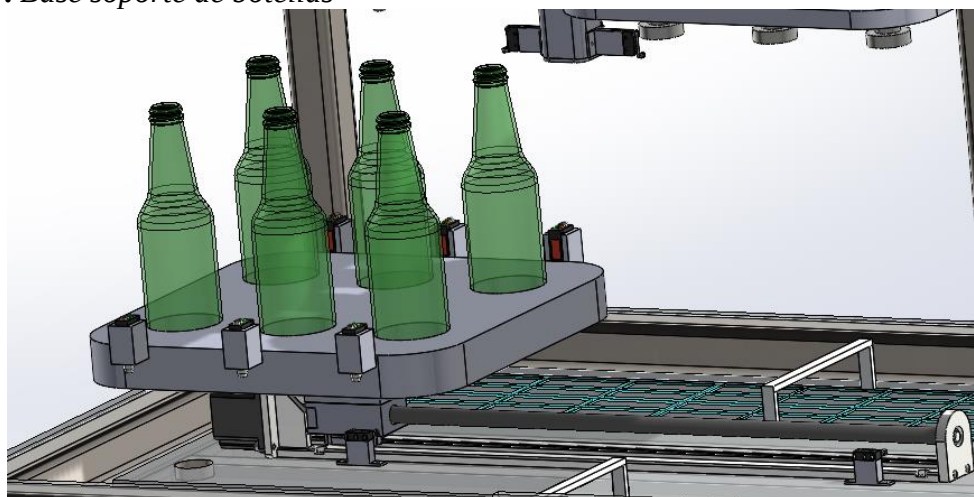
$$m = \delta * v$$

$$m = 7.93 * 3478.21 = 27582.20 \text{ g}$$

$$W = m * G$$

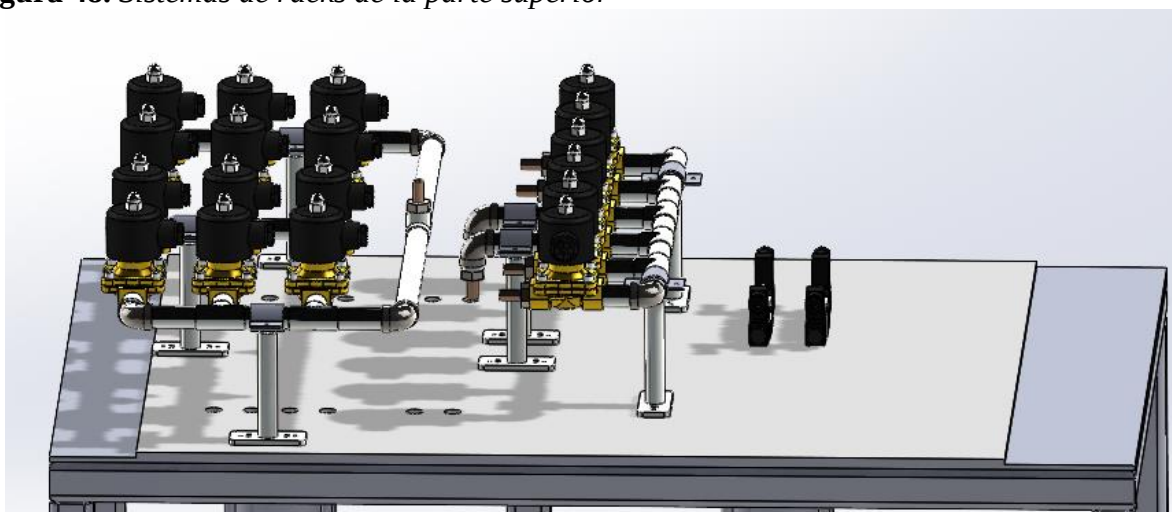
$$W = 27.582 * 9.8 = 270.30 \text{ N}$$

Para determinar el peso total soportado por el riel lineal, se suma el peso de las botellas llenas junto con el peso de los sensores réflex. En total, esta suma asciende a aproximadamente 6,5 kg o 63,7 N. Esta información permite evaluar con precisión la carga que el sistema de rieles lineales deberá soportar durante su funcionamiento.[12]

**Figura 47.** *Base soporte de botellas*

En la parte superior del armazón, se encuentra ubicado el rack de electroválvulas, que facilitan el flujo tanto de CO<sub>2</sub> como de cerveza a través de las mangueras hacia las boquillas de llenado, así como hacia las electroválvulas neumáticas que dirigen el flujo de aire desde la línea de presión hacia los cilindros neumáticos. Este rack ha sido diseñado de manera personalizada y cuenta con un total de 18 electroválvulas, las cuales son responsables de regular el paso de líquido o gas a través del sistema.

La posición exacta del rack puede observarse en las imágenes adjuntas, donde también se pueden visualizar las dos electroválvulas neumáticas encargadas de los cilindros neumáticos. En cuanto al tipo de electroválvulas utilizadas, se proporcionó información detallada sobre ellas en el capítulo anterior, donde se discutió su funcionamiento y su importancia en el contexto del proyecto. Estas electroválvulas desempeñan un papel fundamental en el control y la gestión eficiente del flujo de líquido y gas en todo el sistema de llenado y tapado de botellas.

**Figura 48.** *Sistemas de racks de la parte superior*

Una vez que se han realizado todos los cálculos pertinentes para modelar la máquina completa, a continuación, se presenta una tabla que muestra los materiales utilizados en la construcción del Rack, así como la cantidad en metros de los tubos utilizados. Además, se incluye el peso total del sistema para evaluar el peso total de la máquina. Es importante recordar que los valores presentados son aproximados y que se han utilizado factores de seguridad de 2 en los cálculos, de acuerdo con la naturaleza del proyecto y las recomendaciones pertinentes para este tipo de proyectos en particular.

**Tabla 2.** *Tabla de pesos aproximado del rack de cerveza y CO2*

| <b>Componente</b>                            | <b>Cantidad</b> | <b>Peso unidad (g)</b> | <b>Peso parcial</b> |
|----------------------------------------------|-----------------|------------------------|---------------------|
| Acople T hembra de 3 vías en acero 304       | 12              | 158.75                 | 1905                |
| Codo de 90° hembra en acero 304              | 4               | 181.43                 | 725.72              |
| Acople en cruz hembra de 4 vías en acero 304 | 2               | 206.4                  | 412.8               |
| Soporte para tubo ½ pulgada                  | 3               | 402.56                 | 1207.7              |
| Válvula solenoide de ½ pulgada               | 12              | 50                     | 600                 |
| Racor de ½ pulgada a 10 mm                   | 8               | 30                     | 240                 |

| Componente                                | Cantidad | Peso unidad (g) | Peso parcial |
|-------------------------------------------|----------|-----------------|--------------|
| Tubo de ½ pulgada con 2 pulgadas de largo | 18       | 120             | 2160         |
| Tubo de ½ pulgada con 8 pulgadas de largo | 2        | 200             | 400          |
| Peso total del rack de CO2 y cerveza      |          |                 | 8738.42      |

*Nota:* valores tomados de la tienda online de Amazon [16]

**Tabla 3.** *Tabla de peso aproximado del rack de liberación*

| Componente                             | Cantidad | Peso unidad (g) | Peso parcial |
|----------------------------------------|----------|-----------------|--------------|
| Acople T hembra de 3 vías en acero 304 | 5        | 158.75          | 793.75       |
| Soporte para tubo ½ pulgada            | 4        | 402.56          | 1610.24      |
| Racor de ½ pulgada a 10 mm             | 6        | 30              | 180          |
| Codo de 90° hembra en acero 304        | 3        | 181.43          | 544.3        |
| Válvula solenoide de ½ pulgada         | 6        | 50              | 300          |
| Peso total del Rack de CO2 y Cerveza   |          |                 | 4988.29      |

*Nota:* valores tomados de la tienda online de Amazon [16]

### 4.3. Resultados

El desarrollo final del proyecto se materializa en el diseño presentado en la siguiente imagen, donde se evidencia la aplicación integral de los conocimientos en ingeniería de control y automatización requeridos para su realización. Este diseño también se sustenta en una meticulosa base de cálculos y principios matemáticos que respaldan cada aspecto del trabajo.

El diseño proporciona una solución precisa y detallada para cada uno de los objetivos planteados desde el inicio del proyecto. Además, está equipado con materiales y dispositivos apropiados que garantizan su funcionamiento de manera correcta y eficiente, reflejando la intención original detrás de la creación de este prototipo. No se limita únicamente a ser funcional, práctico y viable, sino que también destaca por su estética cuidadosamente elaborada. En este sentido, la simetría se consideran aspectos clave que han sido cuidadosamente integrada en el

desarrollo de este proyecto, reconociendo que la estética no es menos importante que la funcionalidad, sino que ambos aspectos se complementan para alcanzar un resultado sobresaliente.

**Figura 49.** *Prototipo final*



#### 4.4. Discusión de resultados

El resultado final alcanzado está en total concordancia con las expectativas y los objetivos previamente establecidos. Durante el proceso de diseño, surgieron algunos desafíos que fueron abordados de manera proactiva y resolutiva a través del desarrollo del proyecto. Aunque se definieron ciertos criterios de diseño, fue necesario adoptar enfoques flexibles y considerar diversas perspectivas para asegurar el logro de los objetivos propuestos.

Este proceso implicó un trabajo arduo y dedicado; sin embargo, es satisfactorio concluir que cada paso fue realizado cumpliendo con los rigurosos estándares de la industria cervecera y respetando los parámetros establecidos desde el inicio de la elaboración del proyecto. La adaptabilidad y la capacidad para superar obstáculos fueron fundamentales para garantizar la calidad y la eficacia de los resultados obtenidos. En definitiva, el proyecto se desarrolló de manera exitosa, destacando el compromiso con la excelencia y la búsqueda constante de la mejora continua en cada etapa del proceso.

## **5. Conclusiones**

Gracias a una minuciosa investigación y partiendo de un sólido punto de partida, junto con criterios de diseño bien definidos, se logró concebir un desarrollo apropiado para el proyecto. Este enfoque se basó en las prácticas más comunes para el llenado y tapado de botellas, con la particularidad de adaptarse a las necesidades específicas de una fábrica de cerveza artesanal. Es importante destacar que este proyecto no se concibió para una producción industrial masiva, sino para satisfacer las demandas más particulares de un entorno de menor escala. Este enfoque permitió explorar alternativas que divergían de los métodos convencionales, ofreciendo así una manera más flexible de abordar ciertos procesos asociados con el llenado y tapado de botellas de cerveza.

El diseño mecánico del armazón experimentó un proceso de refinamiento gradual, que incluyó la depuración de conceptos y la iteración sobre modelos previos, hasta llegar al diseño final presentado en este documento. Este proceso se benefició enormemente de la investigación realizada sobre máquinas que ejecutan tareas parciales relacionadas con nuestro proyecto. Al estudiar modelos de máquinas de llenado y tapado que operaban de manera independiente,

pudimos concebir un diseño que integrara ambas funciones en un solo modelo compacto y funcional. Este enfoque se fundamentó en principios de física mecánica y resistencia de materiales, aspectos fundamentales para cualquier ingeniero mecatrónico. De esta manera, el proyecto no solo demuestra la aplicación práctica de los conocimientos adquiridos durante la formación académica, sino que también destaca la capacidad de innovación y adaptación inherente a la ingeniería mecatrónica.

Se ha desarrollado un sistema que cumple con los requerimientos de presión, caudal y disposición de equipos necesarios para el proceso de llenado y tapado de botellas. Este diseño ha sido planificado para garantizar un funcionamiento eficiente y seguro de la maquinaria.

Se ha creado un programa de control completo para el PLC, que abarca desde las secuencias de operación hasta los algoritmos de control específicos para el llenado y tapado. Esta programación proporciona una base sólida para la operación precisa y consistente del sistema automatizado.

La implementación del diagrama GRAFCET facilitó la visualización y comprensión del flujo de trabajo de la máquina. Esto permitió una mejor coordinación entre los diferentes componentes del sistema y una optimización de los procesos de producción.

Se ha desarrollado una interfaz de usuario intuitiva que proporciona una representación visual en tiempo real del funcionamiento del sistema. Esto permite un monitoreo eficiente del proceso de llenado y tapado de botellas, mejorando la capacidad de respuesta ante cualquier anomalía y facilitando la toma de decisiones por parte del operador.

## **6. Trabajos futuros**

Para futuros trabajos, se podría explorar la posibilidad de desarrollar un nuevo modelo mecánico que incorpore diferentes perfiles de tubos, manteniendo los requisitos esenciales para cumplir con los objetivos ya establecidos. Además, en caso de una expansión futura, se podría considerar la modificación de los pistones, el sistema de cambio de zona de botellas y la capacidad de procesamiento de la máquina, con el fin de aumentar la productividad sin comprometer los tiempos de producción. Estas mejoras podrían contribuir significativamente a optimizar el rendimiento y la eficiencia del sistema, preparándolo para adaptarse a las demandas cambiantes del mercado y a las necesidades de producción en constante evolución.

### Referencias

- [1] B. L. Prasanna, G. MadhusudhanaRao, S. Kaushaley, S. Nakka and P. K. Jena, "Automatic bottle filling and capping machine using SCADA with the internet of things," 2022 OPJU International Technology Conference on Emerging Technologies for Sustainable Development (OTCON), Raigarh, Chhattisgarh, India, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/OTCON56053.2023.10114011.
- [2] A. Mahrez et al., "Design a PLC-Based Automated and Controlled Liquid Filling-Capping System," 2022 International Engineering Conference on Electrical, Energy, and Artificial Intelligence (EICEEAI), Zarqa, Jordan, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/EICEEAI56378.2022.10050478.
- [3] Cortez, Alejandra Fernandez. Simulación de la automatización del proceso de llenado y tapado en envases de plástico de 600 ml para la empresa La gran Michoacana. Área de Ciencias y Tecnología, 2010.
- [4] Sanchis llopis, Roberto, et al. Automatización industrial. Universitat Jaume I, 2010.
- [5] N. Nadgauda and S. A. Muthukumaraswamy, "Design and Development of Industrial Automated System using PLC-SCADA," 2019 IEEE 10th GCC Conference & Exhibition (GCC), Kuwait, Kuwait, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/GCC45510.2019.1570521239.
- [6] Koggalage, R. L. W., Wijesinghe, A. G. M. I. S., Caldera, H. P. S. S., & Samarawickrama, R. R. (2021, December). Design and implementation of an automated multi-purpose filling and capping machine. In 2021 From Innovation To Impact (FITI) (Vol. 1, pp. 1-5). IEEE.

- [7] Yazdi, L., Prabuwo, A. S., & Golkar, E. (2011, June). Feature extraction algorithm for fill level and cap inspection in bottling machine. In 2011 International Conference on Pattern Analysis and Intelligence Robotics (Vol. 1, pp. 47-52). IEEE.
- [8] Teja, Salvador Millán. Automatización neumática y electroneumática. Marcombo, 1996.
- [9] García, Hieskar Stwolinsky. Control automatizado de nivel y presión en un tanque de bebidas carbonatadas, EMSULA. 2023.
- [10] Toctaguano Velásquez, Oscar Rubén. Automatización del llenado de botellas y control de calidad de su corona aplicado a la empresa AVERNO. 2021. Tesis de Licenciatura.
- [11] Prieto, Fabián Barrera; SALAMANCA, F. Barrera. diSeño y fabricación de una embotelladora/tapadora para la producción de cerveza arteSanal. Red Colomb. Rev. Ing, 2015, vol. 2, p. 89-97.
- [12] Beer, F. P., & Johnston, E. R. J. ;. D. (2010). *Mecanica de materiales* (5a. ed. --.). Mexico D.F: Mc Graw Hill.
- [13] MOTT, R. L. (2006). *MECANICA DE FLUIDOS* (6a. ed., 1a. reimp.). MEXICO: PEARSON EDUCACION.
- [14] ACIEM, "HMI de alto desempeño bajo norma ISA," en Conferencia ACIEM, 15 de octubre de 2020.
- [15] "Siemens global Website". siemens.com Global Website. Accedido el 10 de febrero de 2024.  
[En línea]. Disponible: <https://www.siemens.com/global/en.html>

- [16] “Amazon.com”. Amazon.com. Accedido el 10 de febrero de 2024. [En línea].  
Disponible: [https://www.amazon.com/-/es/customer-preferences/country/?ref\\_=navm\\_em\\_locale\\_0\\_1\\_1\\_76](https://www.amazon.com/-/es/customer-preferences/country/?ref_=navm_em_locale_0_1_1_76)
- [17] “Nuevas soluciones de llenado y tapado de Cozzoli | El Empaque”. El Empaque. Accedido el 11 de septiembre de 2023. [En línea].  
Disponible: <https://www.elempaque.com/es/noticias/nuevas-soluciones-de-llenado-y-tapado-de-cozzoli>
- [18] “Servicios | PCEBAJIO”. PCEBAJIO. Accedido el 11 de septiembre de 2023. [En línea].  
Disponible: <https://pcebajio.com/servicios/>
- [19] “Actuadores (elementos finales)”. SlideShare. Accedido el 11 de septiembre de 2023. [En línea].  
Disponible: <https://es.slideshare.net/LinderTorricoFlores/actuadores-elementos-finales>
- [20] “Introducción a los sensores”. Electrónica General. Accedido el 11 de septiembre de 2023. [En línea].  
Disponible: <https://electronica-general.blogspot.com/2013/11/introduccion-los-sensores.html>
- [21] “Servicio de Ingeniería – Minianuncios El Carabobeño”. Noticias de Valencia, Carabobo, Venezuela y el Mundo - El Carabobeño. Accedido el 11 de septiembre de 2023. [En línea].  
Disponible: <https://www.el-carabobeno.com/minianuncios/ad/servicio-de-ingenieria-2/>
- [22] “MicrO2 de Bevcorp para refrescos carbonatados | JBT Corporation”. Corporación JBT. Accedido el 11 de septiembre de 2023. [En línea].  
Disponible: <https://blog.jbtc.com/es/2022/11/07/bevcorps-micro2-for-carbonated-soft-drinks/>

- [23] “Ecuación de continuidad: fórmula, aplicaciones, ejercicios resueltos”. Lifeder. Accedido el 11 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.lifeder.com/ecuacion-de-continuidad/>
- [24] “Ecuación de Bernoulli”. Física Termodinamica y de Fluidos. Accedido el 11 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://juanlarafisica.wordpress.com/fisica-segundo-corte/contenidos-tematicos/hidrodinamica/ecuacion-de-bernoulli/>
- [25] Soto, David. (2016). Fuerzas de fijación y momentos de empotramiento en vigas.
- [26] “ISA-101 Standard Addresses the HMI Lifecycle”. ARC Advisory Group. Accedido el 11 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.arcweb.com/blog/isa-101-standard-addresses-hmi-lifecycle>
- [27] “Haydon Kerk Pittman | Products | AMETEK Advanced Motion Solutions”. DC Motors, Linear Actuators, Lead Screw | Haydon Kerk Pittman. Accedido el 11 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.haydonkerkpittman.com/products/linear-rail-systems>